

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Приладобудівний

(назва факультету, інституту)

Приладів і систем орієнтації та навігації

(назва кафедри)

«На правах рукопису»

УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

Бурау Н.І.

(підпис)

(ініціали, прізвище)

« _____ » _____ 2019 р.

МАГІСТЕРСЬКА ДИСЕРТАЦІЯ

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(код та назва спеціальності)

на тему: «Система вимірювань прискорень на основі мікромеханічного датчика

Виконав: студент VI курсу, групи ПГ-81мп

(шифр групи)

Медведчук Юрій Олегович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник: ст. викладач Мураховський С.А.

(вчена ступінь та звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Консультант з: Розробка стартап-проекту

(назва розділу)

доц., к.е.н. Бояринова К. О.

(вчена ступінь та звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент: _____

(вчена ступінь та звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає
запозичень з праць інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____

(підпис)

Київ – 2019

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку посилань, та одного додатку. Загальний обсяг становить 109 сторінок, 44 ілюстрацій та 22 таблиць.

Актуальність: У системах навігації, стабілізації і наведення всіх рухомих об'єктів основними датчиками первісної інформації про кутові, а іноді і лінійними переміщеннями об'єкта є гіроскопи різних типів і акселерометри. З розвитком мікроелектронних технологій тепер можуть бути виготовлені мініатюрні мікромеханічні інерційні вимірювачі.

Мікромеханічні інерційні датчики застосовуються у надзвичайно багатьох сферах. Для отримання вихідної інформації дозволяють створювати невеликі інерціальні навігаційні системи, інтегровані з супутниковими навігаційними системами, які забезпечують необхідну точність визначення положення і орієнтації різних рухомих об'єктів: космічних апаратів, морських суден, наземних транспортних засобів та роботизованих систем. Нетрадиційні застосування мікромеханічних гіроскопічних пристроїв включають системи віртуальної реальності, інтелектуальні іграшки, самохідні снаряди і кулі.

Мета роботи: розробка алгоритму вимірювання прискорень за допомогою мікромеханічного гіроскопа LL типу.

Завдання:

1. Провести огляд стану проблеми вимірювання прискорень мікромеханічними датчиками.
2. Розробити математичну модель об'єкту дослідження.
3. Провести аналіз можливостей вимірювання лінійних прискорень за допомогою мікромеханічного гіроскопа.
4. Провести розрахунок елементів конструкції.
5. Розробити програмну модель мікромеханічного гіроскопа та змоделювати процес вимірювань прискорень

6. Установити функціональну залежність між вихідним сигналом датчика та вхідним прискоренням.

Об'єкт дослідження: Мікромеханічний гіроскоп LL типу

Предмет дослідження: Процес вимірювання прискорень за допомогою мікромеханічного гіроскопа.

Метод дослідження: Тривимірне моделювання елементів конструкції, програмне моделювання вимірювання прискорень, методи теорії пружності, формалізи Лагранжа.

Наукова новизна:

1. Проведено моделювання процесу вимірювання прискорень мікромеханічного гіроскопа LL типу
2. Встановлено функціональну залежність вихідного сигналу вимірювальної системи від вхідного прискорення.

Практичне значення: Полягає в розробці комплексу програмних та тривимірних моделей мікромеханічного гіроскопа.

Публікації:

1. Медведчук Ю.О. Двомасовий мікромеханічний гіроскоп/ Медведчук Ю.О., Сапегін О.М. // Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси (ІРТК-2018): Одинадцята міжнародна науково-практична конференція, Збірка тез / Нац. авіац. ун-т «НАУ». – Київ, 2018. – С. 243-244.

2. Медведчук Ю.О. Двомасовий мікромеханічний гіроскоп L-L типу / Медведчук Ю.О., Сапегін О.М. // Погляд у майбутнє приладобудування: XI науково-практична конференція студентів та аспірантів, Збірник тез доповідей / Нац. техн. ун-т України «КПІ». – Київ, 2018. – С.38-39.

3. Медведчук Ю.О. Двомасовий мікромеханічний гіроскоп/ Медведчук Ю.О., Сапегін О.М. // Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні (ЕІРП-2019): П'ятнадцята Всеукраїнська-практична конференція, Збірка праць конференції / Нац. техн. ун-т України «КПІ». – Київ, 2019. – С. 34-37.

4. Медведчук Ю.О. Безплатформова інерціальна навігаційна система на динамічно налагоджених гіроскопах // Друга Українська науково-технічна

конференція «Спеціальне приладобудування: стан і перспективи» Збірка тез. Київ, Україна –К.: КП СПБ «Арсенал» 2016.– 89-90 с.

Ключові слова: мікромеханічний гіроскоп, інерційна маса, режим руху, режим чутливості , чутливий елемент.

ABSTRACT

The master's thesis consists of an introduction, four sections, conclusions, a list of links, and one appendix. The total volume is 111 pages, 40 illustrations and 22 tables.

Relevance: In the systems of navigation, stabilization and guidance of all moving objects, the basic sensors of the initial information about angular, and sometimes linear displacement of the object are gyroscopes of different types and accelerometers. With the development of microelectronic technologies, miniature micromechanical inertial meters can now be made.

Micromechanical inertial sensors are used in many fields. To obtain baseline information, small inertial navigation systems can be created, integrated with satellite navigation systems that provide the necessary precision for determining the position and orientation of various moving objects: spacecraft, seagoing vehicles, land vehicles and robotic systems. Non-traditional applications of micromechanical gyroscopic devices include virtual reality systems (sensors of initial information about the control parameters of the user movement control), intelligent toys, self-propelled projectiles and balls.

Purpose: to develop an algorithm for measuring acceleration using a LL type micromechanical gyroscope.

Task:

1. To review the status of the problem of measuring acceleration with micromechanical sensors.
2. Develop a mathematical model of the object of study.
3. To analyze the possibility of measuring linear acceleration with a micromechanical gyroscope.
4. Calculate structural elements.
5. Develop a software model for a micromechanical gyroscope and simulate the acceleration measurement process
6. Establish a functional relationship between the sensor output signal and the input acceleration.

Object of study: Micromechanical LL type sensor

Subject of study: The process of measuring acceleration using a micromechanical gyroscope.

Research Method: Three-dimensional modeling of structural elements, software modeling of acceleration measurement, methods of elasticity theory, Lagrange formalisms.

Scientific novelty:

1. The process of measuring the acceleration of the LL-type micromechanical gyroscope is simulated
2. Functional dependence of the output signal of the measuring system on the input acceleration is established.

Practical value: It consists in the development of software and three-dimensional models of micromechanical gyroscope.

Posts:

1. Medvedchuk Yu.O. Two-mass micromechanical gyroscope / Medvedchuk YO, Sapegin OM // Integrated Intelligent Robotics (IIRTK-2018): Eleventh International Scientific and Practical Conference, Abstracts / Nat. aviation. Univ "NAU". - Kiev, 2018. - P. 243-244.

2. Medvedchuk Yu.O. Two-mass micromechanical gyroscope L-L type / Medvedchuk Yu.A., Sapegin OM // Looking into the future of instrument making: XI scientific and practical conference of students and graduate students, Collection of abstracts / Nat. tech. University of Ukraine "KPI". - Kiev, 2018. - P.38-39.

3. Medvedchuk Yu.O. Two-mass micromechanical gyroscope / Medvedchuk YO, Sapegin OM // Efficiency of engineering solutions in instrument making (EIRP-2019): Fifteenth All-Ukrainian Practical Conference, Conference Proceedings / Nat. tech. University of Ukraine "KPI". - Kiev, 2019. - P. 34-37.

4. Medvedchuk Yu.O. A free-platform inertial navigation system on dynamically tuned gyroscopes // Second Ukrainian Scientific and Technical Conference "Special Instrumentation: Status and Prospects" Kiev, Ukraine –K .: KPB SPB “Arsenal” 2016.– 89-90 p.

Keywords: micromechanical gyroscope, inertial mass, motion mode, sensitivity mode, sensing element.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	11
ВСТУП.....	12
РОЗДІЛ 1	
1. АНАЛІЗ МІКРОМЕХАНІЧНИХ ДАТЧИКІВ	13
1.1. Мікроелектромеханічні системи.....	13
1.2. Типи мікромеханічних гіроскопів	17
1.3. Характеристики мікромеханічних гіроскопів	23
1.4. Огляд сучасних ММГ	26
РОЗДІЛ 2	
2. МІКРОМЕХАНІЧНИЙ ГІРОСКОП L-L ТИПУ	32
2.1. Математична модель	32
2.2. Вимушені коливання інерційної маси.....	34
2.3. Рух основи з постійною кутовою швидкістю.....	35
2.4. Кутова вібрація основи.	39
2.5. Вплив поступальних прискорень.....	43
2.6. Розробка тривимірної моделі	49
2.7. Розрахунок пружних елементів	53
2.8. Аналіз пружних елементів.....	53
2.9. Програмна модель	57
2.10. Імпорт моделі використовуючи Simscape Multibody	62
РОЗДІЛ 3	
3. МОДЕЛЮВАННЯ.....	65
3.1. Програмне моделювання	65

РОЗДІЛ 4

4. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ “Система вимірювань прискорень на основі мікромеханічного датчика”	73
4.1. Опис ідеї проекту (товару, послуги, технології)	73
4.2. Технологічний аудит ідеї проекту	76
4.3. Аналіз ринкових можливостей	77
4.4. Розроблення проекту ринкової стратегії.....	84
4.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	87
4.6. Висновки до розділу 4.....	90
ВИСНОВОК	92
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	93
ДОДАТОК А	97
ДОДАТОК Б.....	100

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ММГ – мікромеханічний гіроскоп

МЕМС – мікроелектромеханічні системи

ЧЕ – чутливий елемент

ДКШ – датчик кутової швидкості

ІМ – інерційна маса

РЧ – режим чутливості

РР – режим руху

КМГ – камертонний гіроскоп

ІВМ – інерціальний вимірювальний модуль

ЕОМ – електронна обчислювальна машина

МНК – метод найменших квадратів

ВСТУП

У системах навігації, стабілізації і наведення всіх рухомих об'єктів основними датчиками первісної інформації про кутові, а іноді і лінійними переміщеннями об'єкта є гіроскопи різних типів і акселерометри. З розвитком мікроелектронних технологій тепер можуть бути виготовлені мініатюрні мікромеханічні інерційні вимірювачі.

Управління технологією виробництва тривимірних механічних конструкцій за допомогою мікроелектронних пристроїв і додатків проклало шлях до створення мініатюрних електромеханічних систем. Це новий напрямок в приладобудуванні отримало назву МЕМС-технології (мікроелектромеханічні системи). Один з самих складних пристроїв МЕМС являється мікромеханічний гіроскоп (ММГ), який з'явився на ринку порівняно нещодавно.

Мікромеханічні інерційні датчики застосовуються у надзвичайно багатьох сферах. Для отримання вихідної інформації дозволяють створювати невеликі інерціальні навігаційні системи, інтегровані з супутниковими навігаційними системами, які забезпечують необхідну точність визначення положення і орієнтації різних рухомих об'єктів: космічних апаратів, морських суден, наземних транспортних засобів та роботизованих систем. Нетрадиційні застосування мікромеханічних гіроскопічних пристроїв включають системи віртуальної реальності (датчики початкової інформації про керуючі параметри управління рухом користувача), інтелектуальні іграшки, самохідні снаряди і кулі.

РОЗДІЛ 1

1. АНАЛІЗ МІКРОМЕХАНІЧНИХ ДАТЧИКІВ

1.1. Мікроелектромеханічні системи

Перспективи сучасного приладобудування пов'язані зі створенням приладів володіють малими масою, габаритними розмірами, енергоспоживанням низькою собівартістю при безумовному виконанні цільової функції з заданою точністю.

З 60-х років XX століття почалися науково-технічні розробки в області мініатюрних датчиків і виконавчих пристроїв різного призначення на базі кремнію - основного матеріалу мікроелектроніки. До теперішнього часу цей перелік застосовуваних матеріалів значно розширився, але основним залишається кремній. Єдність матеріалу і технології мікроелектроніки дозволило створювати мініатюрні конструкції на одному кристалі, що об'єднує чутливі елементи, що перетворюють і електронні компоненти, які прийнято називати Мікроелектромеханічними системами (MEMS).

MEMS - це система не тільки конструкцій, а й технологічних процесів (технологій), які використовуються для створення мініатюрних пристроїв. MEMS визначає один з перспективних напрямків розвитку приладобудування XXI століття, яке тягне за собою докорінну зміну промислових і споживчих виробів з безпрецедентним діапазоном застосування. Поряд з терміном "MEMS", що з'явилися в США, в Європі існує термін "мікросистемна техніка", а в Японії - "мікромашини". У вітчизняній науково-технічній літературі для позначення мікросистем, в складі чутливих і (або) виконавчих пристроїв яких є механічно рухливі елементи, застосовується термін "мікромеханічні прилади". Відмітною ознакою цих приладів є їх застосування в області вимірювання механічних величин.

В даний час найбільш динамічно розвиваються мікромеханічні вимірювальні прилади - акселерометри і гіроскопи.

Акселерометри і гіроскопи відносяться до класу інерційних датчиків, діапазон застосування яких досить широкий: від подушок безпеки і антиблокувальних автомобільних пристроїв до інтегрованих з супутниковими навігаційними системами малогабаритних інерційних навігаційних систем, що забезпечують визначення параметрів орієнтації і координат літальних апаратів, надводних але підводних апаратів, наземних транспортних засобів, роботів і ін.

У вітчизняній літературі прийнято таку ієрархію (по висхідній) визначень: датчик - прилад - система. Вимірювальний датчик - пристрій, який виробляє інформацію про зміну вимірюваної фізичної величини. як правило у вигляді електричного сигналу. Пристрій. Виробляє силу (момент). називається датчиком сили (моменту) і може входити до складу вимірювального датчика.

В іноземній, а тепер і у вітчизняній літературі пристрій, який перетворює електричний сигнал в рух, іменується актюатором. Актюатор може створити силу (момент), щоб виконати деяку корисну функцію. Таким чином, датчик сили (моменту) і актюатор - синоніми.

Процес вироблення інформації або сили (моменту) являє собою перетворення однієї форми сигналу або енергії в іншу, що здійснюється перетворювачами. Таким чином, датчик складається з перетворювачів, що утворюють вимірювальну або (н) силову ланцюга. У той же час і сам датчик можна розглядати і визначати як перетворювач.

Вимірювальним приладом зазвичай називають пристрій, який крім функції вимірювання може виконувати (все або частково) функції реєстрації, відображення, зберігання, передачі інформації про вимірюваної фізичної величиною. Сучасна схемотехніка і елементна база наділяють датчики можливостями, що переводять їх в поняття "прилади". По суті, вимірювальний датчик і вимірювальний прилад, що виробляють інформацію про вимірювання однієї і тієї ж фізичної величини і мають однакові функціональні можливості, є поняттями синонімами.

Тому цілком допустимо називати прилади для вимірювання: тиску - датчиками тиску, вологості (гігрометри) - датчиками вологості, температури (термометри) - датчиками температури, прискорень (акселерометри) - датчиками

прискорення, кутових переміщень в інерціальному просторі (гіроскопи) - гіроскопічними датчиками кутів і т.д.

В єдину конструкцію можуть бути об'єднані кілька вимірювальних датчиків, наприклад температури. Вологості, тиску. Очевидно, що назва такої конструкції має починатися зі слова "прилад".

Поняття "система" може відноситися не тільки до сукупності приладів (датчиків), не пов'язаних або об'єднаних між собою інформаційними каналами, а й до сукупності окремих компонентів, що мають різну фізичну природу (механічну, електронну та ін.), Проте разом виконують єдину функціональну (вимірювальну) завдання. Таким чином, з позицій об'єднання (інтегрування) різнорідних компонентів будь-вимірювальний прилад (датчик) є системою.

Розглянемо визначення, що відносяться до мікроприладів (мікродатчик), перші дослідження по яким були розпочаті в США; там же виникла аббревіатура MEMS - мікроелектромеханічні системи. MEMS - це інтегровані системи з розмірами від декількох мікрометрів до міліметрів, які об'єднують в собі механічні і електричні електронні компоненти.

MEMS складається з механічних мікроструктур, мікродатчиків, мікроактюаторів і мікроелектроніки, що об'єднуються на одному кремнієвому чіпі (рис. 1.1). Виготовлення мікроструктур можливо також з інших матеріалів.

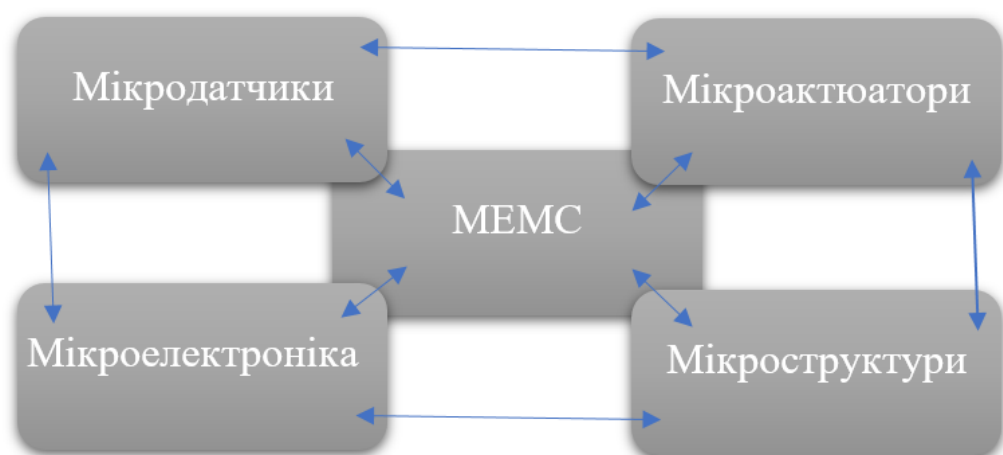


Рис.1.1. Взаємоз'язок MEMS-компонентів

Мікродатчики виявляють зміни в навколишньому середовищі, вимірюючи механічні, "теплові, магнітні, хімічні або електромагнітні величини. Мікроелектроніка обробляє цю інформацію і сигналізує мікроактюаторам, щоб вони створили деяку форму змін по відношенню до навколишнього середовища або в самій системі.

У той час як електронні (електричні) пристрої виготовляються за технологією інтегральних схем (ІС), механічні компоненти для виготовлення вимагають складних маніпуляцій з кремнієм і іншими підкладками, в тому числі мікромеханічними обробки. Якщо ІС призначені для експлуатації електричних властивостей кремнію, то в МЕМС використовуються або механічні властивості кремнію, або його електричні і механічні властивості.

Крім аббревіатури МЕМС в Європі існує аббревіатура МСТ - мікро системна технологія, а в Японії застосовується термін "мікромашини".

Слід підкреслити, що відповідно до іноземними джерелами, МЕМС - це не стільки мініатюрні мікросистеми, скільки промислова технологія, так же, як і МСТ, яка є підмножиною МЕМС. Ця обставина ілюструється (рис. 1.2), з якого видно, що комбінації компонентів електроніки, механіки та оптики дозволяють створювати МЕМС, оптомеханічні і оптикоелектричні мікросхеми, а також мікрооптоелектромеханічні системи (МОЕМС), які є підмножиною МСТ і разом з МЕМС формують нові галузі технології.

Існують значні збіги, але є і відмінності в термінах, що відносяться до областям технології і застосування. У вітчизняній літературі, наприклад, аббревіатура МСТ розшифровується як "мікросистемна техніка". Для мікросистем різного застосування широко використовується термін "інтегральні датчики".

Загальним терміном для мікросистем різного застосування, є "перетворювач", сукупність яких, об'єднаних в вимірювальні ланцюги, утворює вимірювальні мікроприлади, що відносяться до підмножини МЕМС. Мікроприлад (мікродатчик) може використовуватися в різних енергетичних областях, які характеризуються певними фізичними величинами.

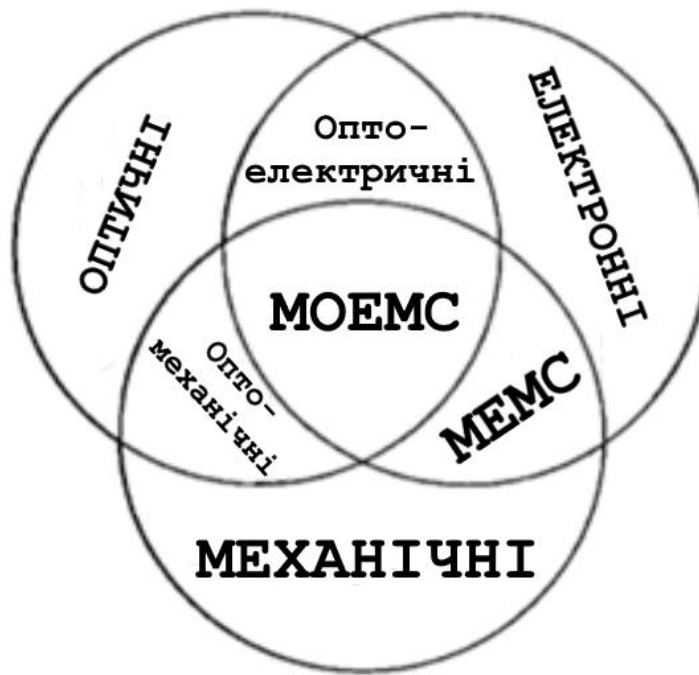


Рис. 1.2. Комбінації МЕМС-компонентів.

Можна виділити групи мікроприладів (мікродатчиків) для вимірювання механічних, теплових і т.д величин. Елемент (компонент мікроструктури), що реагує на зміну вимірюваної фізичної величини, можна визначити як первинний перетворювач, або чутливий елемент (ЧЕ).

Таким чином, мікромеханічні прилади - це мікроструктури з сервісної електронікою, виконані за технологією МЕМС з механічно рухомим ЧЕ. [1]

1.2. Типи мікромеханічних гіроскопів

Мікромеханічний, або мікрогіроскоп (МГ), являє собою електромеханічну систему, в якій енергія вимушених (первинних) коливань інерційної маси (ІМ) на пружному підвісі (резонаторі) при появі переносної кутової швидкості перетворюється в енергію вторинних коливань, що містять інформацію по вимірянній кутовій швидкості. Це перетворення виконується за рахунок впливу сил (або моментів) Коріоліса на резонатор при обертанні резонатора з переносною кутовою

швидкістю, вектор якої перпендикулярний до вектору імпульсу або кінетичного моменту, або до обертальних первинних коливань ІМ.

Первинні коливання називають також режимом руху (РР) або рухом по координаті збудження, а вторинні коливання називають режимом чутливості (РЧ) або рухом по координаті вихідного сигналу.

Мікромеханічні гіроскопи LL типу

До простих гіроскопів LL типу відноситься мікромеханічний одномасовий гіроскоп, схема якого показана на (рис. 1.3).

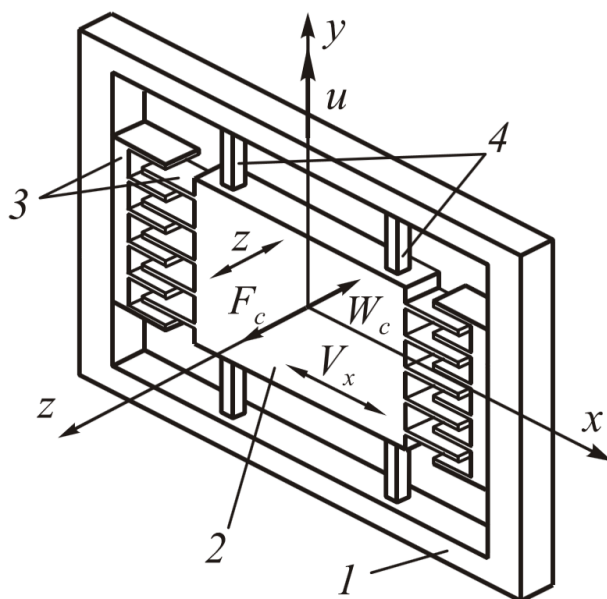


Рис.1.3. Схема одномасового ММГ

Інерційна маса 2 прикріплюється до основи 1 за допомогою пружних елементів 4. Квадратна або щільна частина елементів підвіски змушує інерційну масу рухатися в напрямку осей x і z . Періодичні коливання перекладу вздовж осі x збуджуються гребінчастим електростатичним приводом (актюатором) 3. Коли основа обертається відносно осі y при кутовій швидкості u , інерційна маса буде вторинними коливаннями під впливом сил Коріоліса F по осі z .

Щоб виміряти кутову швидкість уздовж осі, перпендикулярної до площини гіроскопа, використовується ММГ з додатковою рамою (рис. 1.4).

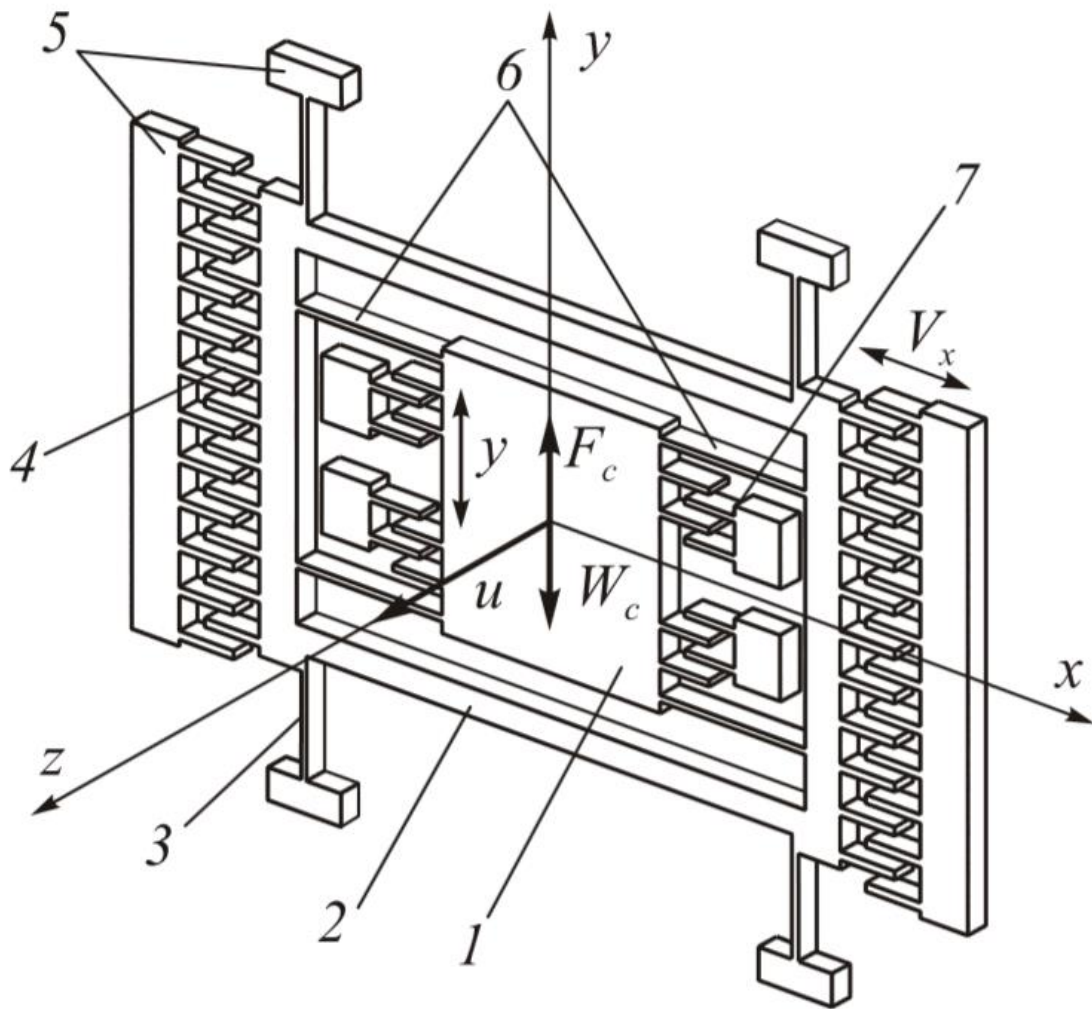


Рис 1.4. Мікромеханічний гіроскоп з додатковою рамкою

При цьому інерційна маса 1 з'єднана з рамою 2 за допомогою пружної підвіски 6, яка дозволяє переміщатися уздовж осі y . Цей рух виявляється датчиком місткості 7. Рама з'єднана з основою 5 за допомогою пружної підвіски 3. Елементи підвіски 3 і 6 мають прямокутний поперечний переріз. У рамі поступальні коливання збуджуються уздовж осі x за допомогою виконавчого механізму 4, який передається на інерційну масу через пружні зв'язку 3. Кутова швидкість підстави u призводить до появи сил Коріоліса з F , які викликали поступальні коливання внутрішнього каркаса вздовж осі y . Амплітуда вторинних коливань залежить від величини вимірюваної кутової швидкості.

Мікромеханічні гіроскопи LR типу.

Прикладом гіроскопів LR являється камертонний мікромеханічний вібраційний гіроскоп (рис. 1.5).

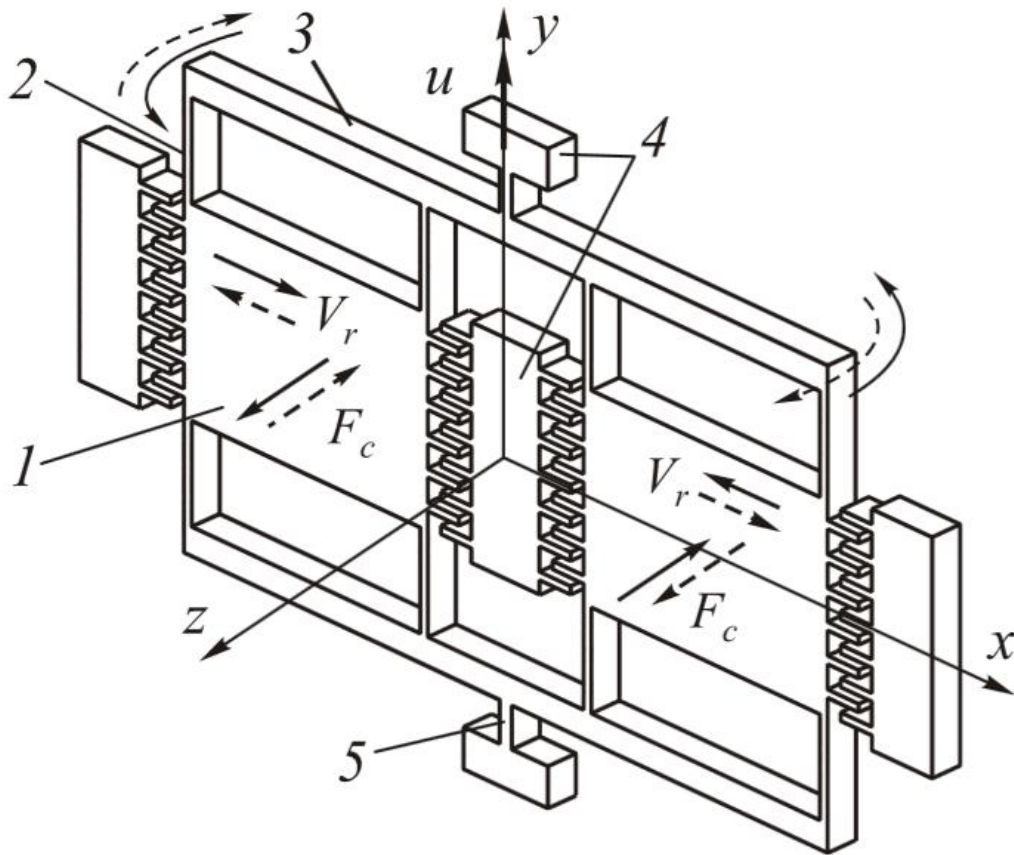


Рис.1.5. Камертонний мікромеханічний гіроскоп

Конструкція складається з двох інерційних мас 1, які з'єднані із зовнішнім рамою 3 за допомогою пружних елементів 2. Рамка з'єднана з основою 4 за допомогою пружних елементів 5. Електростатичний привід (електродвигун) збуджує коливання маси при зсуві по фазі уздовж вісь x 3 появою кутової швидкості u від підстави уздовж осі y Коріоліса сили F_c викликають в залежності від співвідношення між жорсткістю елементів підвіски або поступальним рухом інерційних мас уздовж осі z або кутових коливань рами разом з інерційні маси навколо осі y . Кутові коливання рами вимірюються електростатичними датчиками під інерційними масами.

Таким чином, в разі поступального характеру вторинних коливань інерційних мас камертон ММГ є два одномасових гіроскопа, з'єднаних диференціальної

ланцюгом. Недоліком розглянутої схеми ММГ є розбіжність власних частот поступальних коливань інертних мас через виробничі дефекти. Це вимагає регулювання частоти.

Мікромеханічні гіроскопи RR типу

Типовим прикладом побудови гіроскопа RR типу є дисковий ММГ (рис. 1.6.).

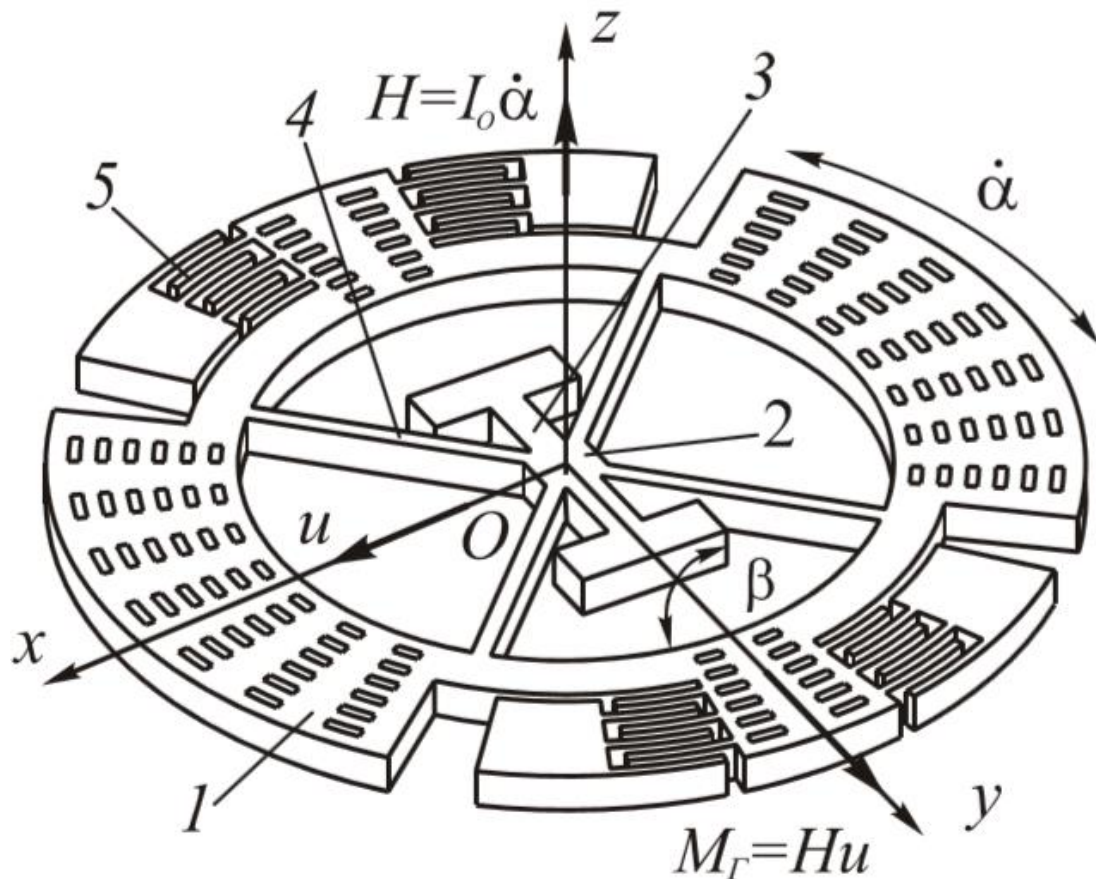


Рис.1.6. Дисковий мікромеханічний гіроскоп

У цій схемі кутові рухи диска 1 навколо осі z збуджуються гребінчастим двигуном 5 з частотою, рівній частоті природних кутових коливань. Сили Коріоліса виникають при кутовій швидкості підстави, змушуючи диск коливатися уздовж осі, перпендикулярної його відносної швидкості і переносний кутовий швидкості підстави u. [2]

Двохмасові мікромеханічні гіроскопи

Сучасні вимоги до характеристики показників ММГ постійно зростають у зв'язку з розширенням областей застосування, вони в значній мірі характеризуються все більш високим рівнем зовнішніх чинників, зокрема більш широким діапазоном параметрів вібрації та удару. Розширення існуючої сфери застосування ММГ вимагає вирішення цілої низки конкретних завдань, найбільш важливою з яких є підвищення стійкості датчиків до механічних зовнішніх впливів. Аналіз існуючих і розроблених способів, методів і технічних рішень для підвищення стійкості ММГ до механічних зовнішніх чинників дозволяє розділити методи на структурні і структурно-алгоритмічні [3]. Гіроскопи типу LL з поступальним рухом інерційної маси (ІМ) за принципом побудови найбільш чутливі до поступальним коливань, особливо в діапазонах власних частот. Вплив лінійних прискорень призводить як до додаткових зсувів ІМ при навантаженні пружної підвіски, так і до появи небажаних резонансних явищ. Отже, в таких конструкціях необхідно знизити рівень вібраційних ефектів або збільшити власні частоти вище верхньої межі встановленого діапазону частот вібрації, збільшити опір прискоренню, але знизити чутливість приладів до вимірювання кутова швидкість.

Одним з найбільш важливих методів підвищення стійкості до зниження чутливості LL типу ММГ при рівнях лінійного прискорення, який зазвичай використовується при розробці нових пристроїв, є вибір оптимальної кількості ІМ в одній ММГ для компенсувати вплив інерційних навантажень (сил інерції) на окремі ЧЕ. Принцип дії таких пристроїв заснований на використанні двох або більше ІМ, які виконують протифазні коливання, що дозволяє використовувати диференційований режим вимірювання і позбавлятися від інерційних прискорень [4].

На рис. 1.7 показана схема двомасового ММГ з негативним зворотним зв'язком за сумою вихідного сигналу двох ЧЕ, побудованого на основі ММГ з диференціальним виходом [5] через деякого ускладнення внутрішньої структури датчик.

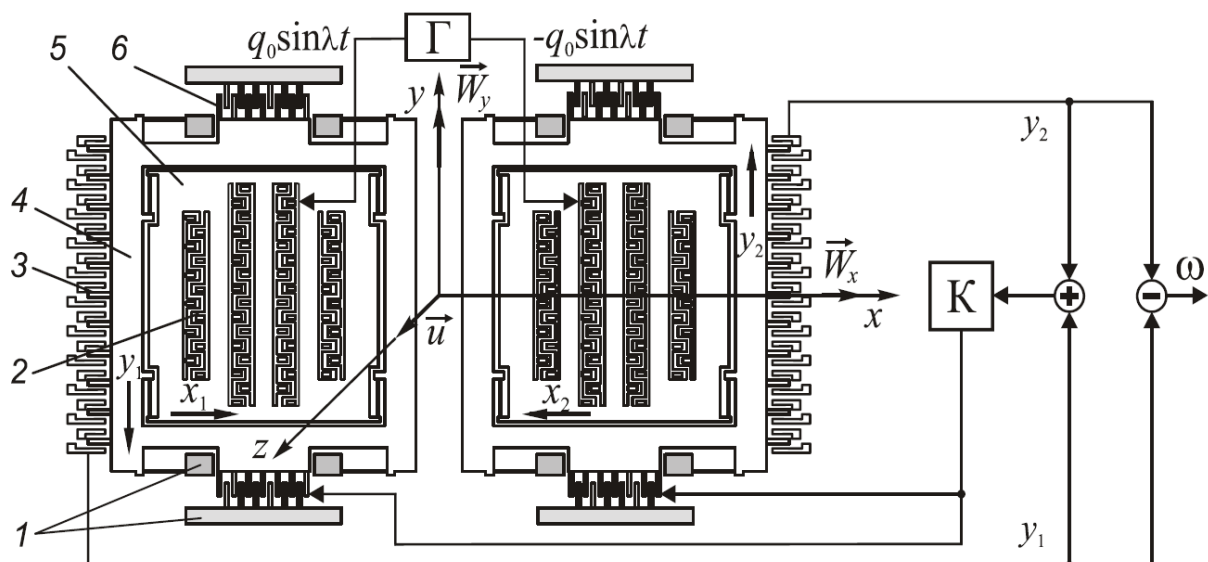


Рис. 1.7 Мікромеханічний датчик із системою зворотного зв'язку:

Мікромеханічний датчик містить два ідентичних елемента виявлення. Кожен чутливий елемент складається з інерційної маси 5, рами 4, підстави 1, системи збудження 2, ємнісного датчика 3, пристроїв для додавання і віднімання вторинних коливань. [6]

1.3. Характеристики мікромеханічних гіроскопів

Кожен тип ММГ характеризується серією класифікаційних функцій, найбільш важливими з яких є наступні.

1. Кількість вимірювальних осей. ММГ можуть вимірювати кутові швидкості уздовж однієї або двох координатних осей. Тому їх можна класифікувати за кількістю вимірювальних осей: один або два компоненти.

2. Кількість інерційних мас. Найважливішим елементом ММГ є ІМ, поступальний рух якого призводить до появи імпульсу, а поворот - до імпульсу. Виходячи з цього, можна провести відмінність між ММГ з одного масою і декількома масами (дві або більше). Відноситься до всіх типів ММГ.

3. Тип підвіски. Відомі два типи підвісок: механічні (контактні) і безконтактні. Механічні підвіски виконані у вигляді пружних мікроструктур з різними конфігураціями (стрижень, петля, котушка і т. д.). Елементи підвіски можуть бути розташовані по колу ІМ і таку підвіску можна назвати зовнішньою або зовнішньою.

Бачите, це може бути в просторі самого ІМ або між інерційними масами в мультимасових ММГ. Такі припинення можуть бути згадані всередині.

Будь-яка форма безконтактної підвіски, реалізована відповідно до фізичним принципом, який пропонує левітація («ширяння») ІМ, в принципі можлива.

4. Наявність кінематичних зв'язків. Відомо, що для роботи ММГ необхідно підтримувати постійну частоту і амплітуду коливань (або масу). У схемах з одного масою для вирішення цієї проблеми використовуються електронні схеми і додаткові датчики. У мультимасових ланцюгах разом з електронними засобами рівність частот і амплітуд може бути досягнуто за допомогою кінематичного зв'язку між ІМ. Кінематичний зв'язок є аналогом пари, яка використовується в класичних двох гіроскопических схемах. Кінематичний зв'язок може бути реалізована одночасно в РР, РЧ або обох. Існують і інші типи кінематичних зв'язків між ІМ, наприклад, для збільшення масштабного коефіцієнта.

5. Тип руху ІМ. Можливі два типи взаємного руху ІМ в РР і РЧ. У першому випадку в обох режимах руху ІМ (або маса) рухається в одній площині, у другому випадку ІМ в РЧ залишає площину їх руху в РР.

6. Тип приводу (інвертори). У ММГ ви можете використовувати будь-який тип інверторів (приводів). забезпечити спрацьовування ІМ в режимі руху з налаштованим параметрами: магнітоелектричним, електромагнітним, п'єзоелектричний. У розглянутих типах МГ найбільш поширений електростатичний привід, що виконаний у вигляді гребінчастих конструкцій.

7. Тип датчика сигналу (інвертори). У ММГ ви можете використовувати будь-який тип прямих перетворювачів (датчиків для вибірки сигналу), які видають інформацію про виміряної кутовий швидкості: електростатичний, магнітоелектричні, п'єзорезистивного, оптичні та ін.

І там вони нашаровуються в масі матеріалу, мала кристалічну мікроструктуру МГ, з яких робочих процесів електронних пристроїв, є багато інших, допомоги по технології, на один (або більше) мікроструктурованих шарах. Гібридна технологія, яка може виробляти МГ - MEMS резонатор, виготовлений в техніці та електроніці - традиційно окремих платах.

Невелика частина амплітуди коливань призначена в якості перших і других частот коливань, необхідних для балансу власної частоти резонатора одного до одного.

МГ працюють на прямому шляху, і компенсаційним перетворенням.

Разом з даним видом розвиваються МР, які можна визначити як камертон і хвилі. Характерною особливістю камертона ММГ (КМГ) є наявність стрижневих конструкцій («ніжок»). Важливо, щоб ніжки ІМ, як правило, були рівномірно розподілені по довжині і мали вільний неприкріплений кінець. Коли виникає переносна кутова швидкість, вектор якої перпендикулярний векторам величини руху елементних мас, розподілених уздовж ніг, виникають сили інерції Коріоліса, які генерують вторинні коливання ніг КМГ.

Відмінною особливістю хвильових ММГ є наявність кільцевих резонаторів, прикріплених до корпусу за допомогою пружних елементів підвіски, або форми стрижня, до прикріплення якого в корпусі застосовуються поздовжні і поперечні коливання.

Кільце пульсує в двох взаємних напрямках (поперечна пружна хвиля), тобто періодично у формі овалу. Коли кільце обертається навколо осі, перпендикулярної його площині, швидкості обертання вісь, уздовж якої пульсує кільце (головна вісь овалу), буде менше швидкості обернутого тіла і, отже, кільця. Кут запізнювання несе інформацію про кут повороту підстави інерційного простору.

В цьому випадку генерується стояча хвиля, яка передуює появі переносний кутовий швидкості підстави. Процес генерації стоячій хвилі також спостерігається в так званих барних гіроскопах.

Типовими характеристиками ММГ є: діапазон виміру, чутливість, ширина смуги частот, масштабний коефіцієнт і стабільність, перехресна чутливість, шум, температурна стабільність характеристик і інших робочих параметрів і характеристик.[1]

1.4. Огляд сучасних ММГ

Прийнято вважати, що історія розвитку мікроелектромеханічних систем (MEMS) стартувала в 1954 році, коли був відкритий п'єзореzystивного ефект в матеріалах Ge і Si, який знайшов згодом своє застосування в перших датчиках тиску і прискорення. Старт виробництва MEMS в світових масштабах відноситься до початку 1990-х років. [1] На сьогоднішній день налічується більше ста компаній в США, Європі і на Далекому Сході, що працюють в області MEMS, в тому числі транснаціональних корпорацій, таких як TRW Novasensor, Analog Devices, Motorola, Honeywell, Melexis, Infineon і Mitsubishi [7]. Відповідно до заяв аналітиків конгресу MEMS Executive Congress, фінансовий обсяг світового ринку MEMS відчуває стабільний приріст починаючи з 2012 року і до кінця 2018 року має переступити рубіж в 22 млрд. \$ (Рис. 1.8). Ключовим аспектом в напрямку розвитку MEMS є характер кінцевого споживчого застосування даного типу пристроїв. Так, технологія MEMS дала новий імпульс розвитку систем інерціальної навігації та інтегрованих систем, основою яких є мікромеханічні гіроскопи (ММГ), призначені для визначення кутового положення об'єкта в просторі. Згідно з даними маркетингової дослідницької організації Yole Developpement ринок ММГ, як і загальний ринок MEMS, в фінансовому вираженні починаючи з 2012 року зазнає стабільний приріст близько 4,5% в рік.

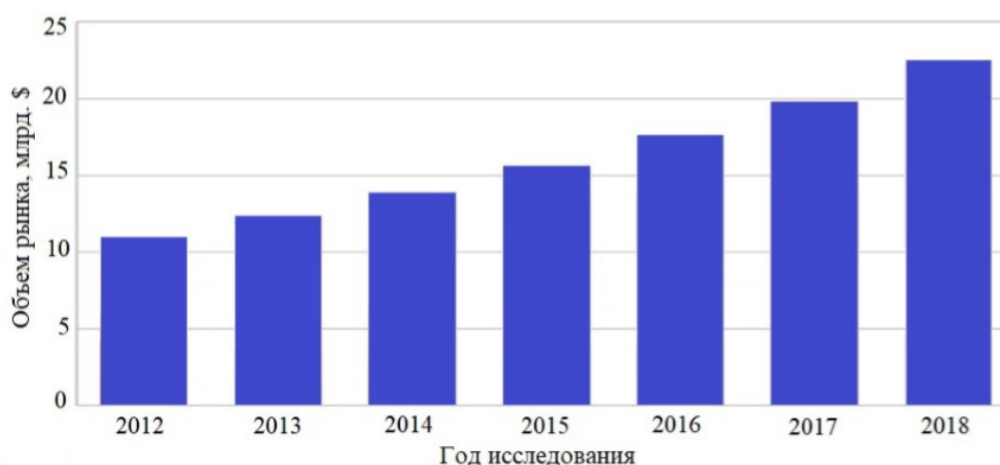


Рис. 1.8. Фінансовий обсяг світового ринку MEMS

Також, в рамках підтвердження загального зростання ринку ММГ, важливою є інформація про динаміку винахідницької активності в цій області. Аналіз проводився на основі даних про кількість поданих заявок на винаходи в національні патентні відомства провідних країн світу, таких як Канада, Китай, США, Японія, Великобританія, Німеччина і Франції, а також міжнародні патентні організації (Європейське патентне відомство, Всесвітня організація інтелектуальної власності). Дослідження охоплює період з 1998р. по 2017р. і поділяється на 6 етапів. При розгляді даної статистики (рис.1.9) явно простежується той факт, що кількість винаходів на кожному новому етапі практично в два рази перевершує кількість винаходів на попередньому етапі. Найбільш сильний стрибок спостерігається на другому етапі дослідження, коли кількість винаходів перевищило показник першого етапу на 325%. Однак в кількісному вираженні найбільший приріст, що склав більше 4000 заявок на винаходи, зафіксований на 5 етапі дослідження.

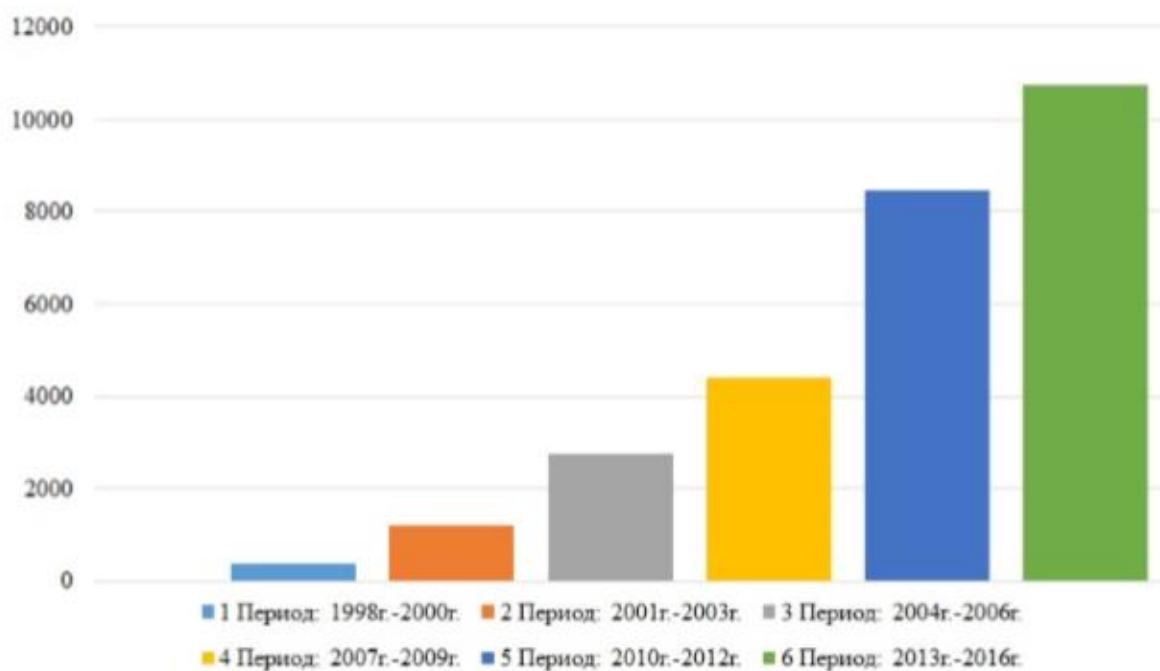


Рис. 1.9. Кількість поданих заявок на патенти в розбивці по етапах

Серед різних типів ММГ найбільш динамічний розвивається ринок 3-х осьових ММГ (рис. 3), масове виробництво яких бере свій початок з 2009 року. Цей факт обумовлений збільшенням попиту на різні медіа пристрої, в тому числі

мобільні телефони та планшети, в яких 3-х осьові ММГ знайшли своє застосування. Так обсяг ринку 3-х осьових ММГ, що становив у 2011 році 458 млн. \$, До 2017 року досяг показника в 1,57 млрд. \$, А в 2018 році очікується його збільшення ще на 22,8%. Також в ході аналізу заявок, поданих на винаходи тематики ММГ, простежується явний спад в розробках конструктивних рішень, при цьому збільшується число методів і способів застосування даних приладів в нових областях техніки.

Systron Donner оголосила про випуск одноосного цифрового кварцового гіроскопа SDD3000, рівень продуктивності якого можна віднести до тактичного класу. Пристрій оптимально підходить для тих завдань, яким сприяє безпрецедентний низький рівень шуму (ARW) менше $0,02^\circ/\sqrt{\text{год г}}$ і стабільність при роботі на $1^\circ/\text{год}$. Програми включають стабілізацію платформи, системи AHRS, безпілотники і наземну навігацію. Зсув стабільності $1^\circ/\text{год}$ відповідає рівню тактичної продуктивності. Інші стандартні відхилення температури зміщення, зазначені в специфікації трьох версій датчиків, складають 1, 3 і $10^\circ/\text{год}$ відповідно.

Пристрій з цифровим виходом RS232 або RS422 укладено в корпус розміром 78x83x25 мм, що полегшує інтеграцію. Заявлений термін служби пристрою становить близько 20 років.

В даний час Tronics пропонує свій перший потужний гіроскоп GYPRO2300, розроблений після багаторічного аналізу споживчого попиту. MEMICS gyroscope Tronics - це одновісне пристрій Z, невелике за займаним обсягом ($0,55 \text{ см}^3$) і легке (2,6 г), яке має 24-бітний вихід.

Зазначені такі основні параметри:

- Нестабільність зміщення: $1^\circ/\text{год}$.
- Щільність звуку: $10^\circ/\text{год}/\sqrt{\text{Гц}}$.
- Помилка попередньої температури: $\pm 0,05^\circ/\text{с}$

Sensorog випустив інерційних вимірювальний прилад STIM300, який об'єднує три високоточних гіроскопа MEMS, три вимірювача прискорення і три інклінометра. За характеристиками гіроскопа датчик відноситься до вищого тактичного класу. Заявлені характеристики гіроскопа в інерційному модулі такі:

- Нестабільність зміщення: $0,5 \text{ } ^\circ/\text{год}$.
- Шумові показники: близько $0,15 \text{ } ^\circ/\sqrt{\text{год}}$. Температурний дрейф зміщення становить $10 \text{ } ^\circ/\text{год}$, а вимірювальний діапазон— $400 \text{ } ^\circ/\text{с}$.

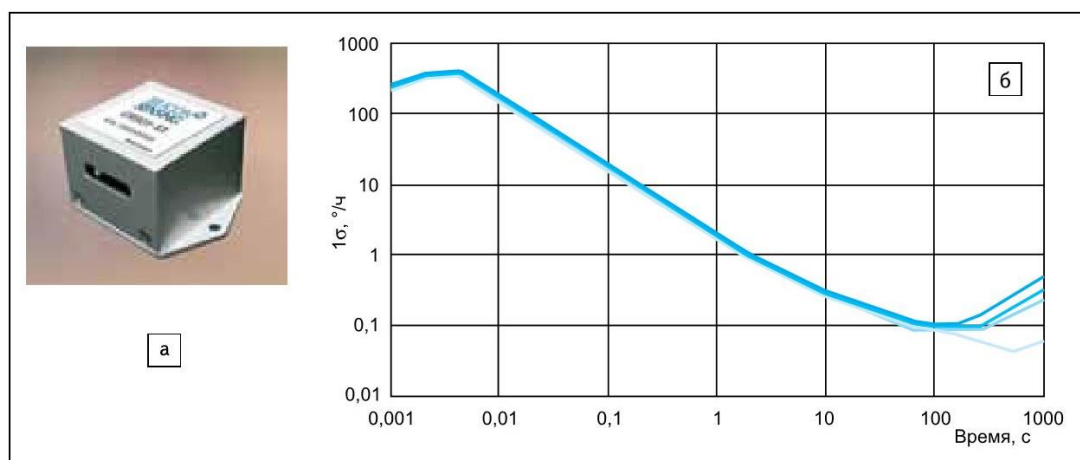


Рис.1.10. Прецизійний MEMC-гіроскоп Silicon Sensing Systems CRH01 тактичного класу: а) зовнішній вигляд; б) крива Аллана

Як видно, заявлені характеристики гіроскопа від Sensorog в умовах, близьких до ідеальних, з більшою підставою дозволяють зарахувати його до тактичного класу.

Ще більш високі характеристики має одновісний MEMC-гіроскоп Silicon Sensing Systems CRH01 (рис.1.6), що представляє собою розробку на основі вібраційного кільця з індуктивним приводом VSG3.

Судячи з усього, заявлені ознаки гіроскопа Sensorog в умовах, які практично ідеальні, з більшою підставою дозволяють вважати його тактичним класом.

Ще більш високими властивостями володіють одновісні датчики гіроскопу MEMC - CRH01 (рис. 1.10), конструкція яких заснована на вібраційному кільці з індуктивним приводом VSG3.

Найбільш важливі параметри пристрою:

- Нестабільність зміщення: $0,2 \text{ } ^\circ/\text{год}$ (для версії CRH01-025).
- Шум: приблизно $0,04 \text{ } ^\circ/\sqrt{\text{год}}$.
- Відхилення зміщення температури: $\pm 0,2 \dots \pm 0,5 \text{ } ^\circ/\text{с}$.

Були розроблені чотири варіанти датчика з діапазонами вимірювання від ± 25 до $\pm 400 \text{ } ^\circ/\text{с}$.

Крива Аллана для версії датчика кутової швидкості в діапазоні $\pm 25^\circ / \text{с}$ ясно показує, що його звичайна нестабільність зміщення краще, ніж $0,1^\circ / \text{ч}$, а випадкове зміна кута (ARW) краще, ніж $0,02^\circ / \sqrt{\text{год}}$, до недавнього часу цей рівень продуктивності був досяжний тільки з гіроскопами FOG і RLG.

Silicon Sensing, за рік до публікації цієї статті, оголосила про розробку нової лінійки інерційних датчиків, модулів і систем, що характеризуються низьким зносом (менш $0,3^\circ / \text{год}$) на основі індуктивного MEMC-гіроскопа, недорогої альтернативи оптоволокну. оптичні продукти. Але, як бачите, реально досягнуті характеристики MEMC-гіроскопів Silicon Sensing Systems Ltd. виявилися ще вищими.

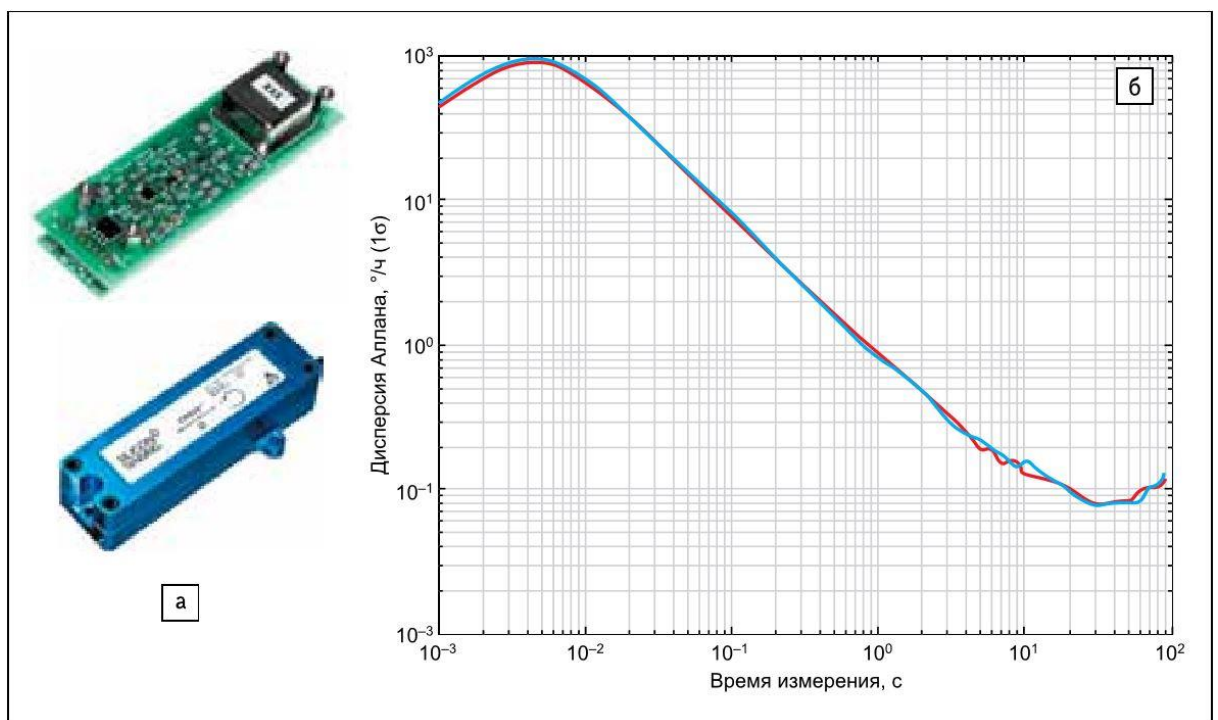


Рис.1.11. MEMC-гіроскопи серії CRS39 Silicon Sensing з лідируючої нестабільністю зміщення приблизно $0,08\text{--}0,1^\circ / \text{год}$: а) зовнішній вигляд; б) крива Аллана

В даний час найбільш важливим очікуваною подією є випуск комерційних MEMC-гіроскопів Silicon Sensing з серії CRS39 на основі чутливого елемента індукційного типу SGH03 з підвищеним добротністю останнього покоління VSG3QMAX (рис. 1.11).

Silicon Sensing вже поставляє датчики CRS39-01 і CRS39-02 в стандартній комплектації, в корпусному і не корпускулярном виконанні, вони також мають

низьку нестабільність 0,2-0,3 °/год і ARW 0,017 °/год. Прилади MEMC тактичного класу мають таке ж відхилення температури, як і багато інших датчики, і складають 3 ± 10 °/год (максимум ± 30 °/год), а діапазон виміру становить всього ± 25 ° / с. Оголошено, що гіроскоп CRS39-03 характеризується поправкою на нестабільність приблизно 0,08-0,1 °/год, яка виходить за межі верхнього тактичного рівня і в достатній мірі порівнянна з характеристиками волоконно-оптичних і кільцевих лазерних гіроскопів; зазначений показник випадкового догляду становить не більше 0,0083-0,015 °/√год, а власний середньоквадратичний звук не більше 0,01 ° / с.

Використовуючи масив гіроскопів як приклад, Silicon Sensing продемонстрував поліпшення властивостей нестабільності зсуву в порівнянні з типовими значеннями 0,3-0,08°/год і ARW-шумом 0,013-0,0083 °/√год. , В даний час MEMC-характеристики гіроскопів Silicon Sensing є найвищими, тому датчики використовуються в високоточних високопродуктивних системах.

Silicon Sensing також продемонстрував здатність свого гіроскопа точно визначати північ (до 0, °/√год).

Загалом, MEMC гіроскопи не досягнули тактичного рівня продуктивності, що відповідає стабільності переміщення 1°/год. Це було реально, а не в умовах випробувань. Стабільність зміщення кращих гіроскопів MEMC оцінюється в реальних умовах в діапазоні 5-30 °/год Але в останні роки гіроскопи MEMC від провідних виробників - прикладом можуть служити продукти Silicon Sensing - показують абсолютну реальність досягнення технології MEMC тактичного класу [8-13].

РОЗДІЛ 2

2. МІКРОМЕХАНІЧНИЙ ГІРОСКОП L-L ТИПУ

Об'єктом дослідження обрано мікромеханічних гіроскоп LL-типу. Необхідно підготувати математичну модель, розробити ескізний проект ММГ в середовищі SolidWorks і реалізувати програмне моделювання пристрою.

2.1. Математична модель

Найпростіший генератор вібруючого гіроскопа являє собою одномасового тип LL, схема якого наведена на рис. 1.1.

Додайте рівняння руху цього гіроскопа. Ми пов'яжемо базу з системою координат $Ox_c y_c z_c$ (рис.2.1) і з масою інерції — $Oxyz$. Припустимо також, що підстава, на якому встановлений гіроскоп, обертається в інерціальній просторі з кутовою швидкістю ω , яка визначається його виступами u_{x_c} , u_{y_c} і u_{z_c} і на осі координат $Ox_c y_c z_c$. Положення центру мас елемента виявлення (інерційна маса) задається вектором $r = \{x, 0, z\}$.

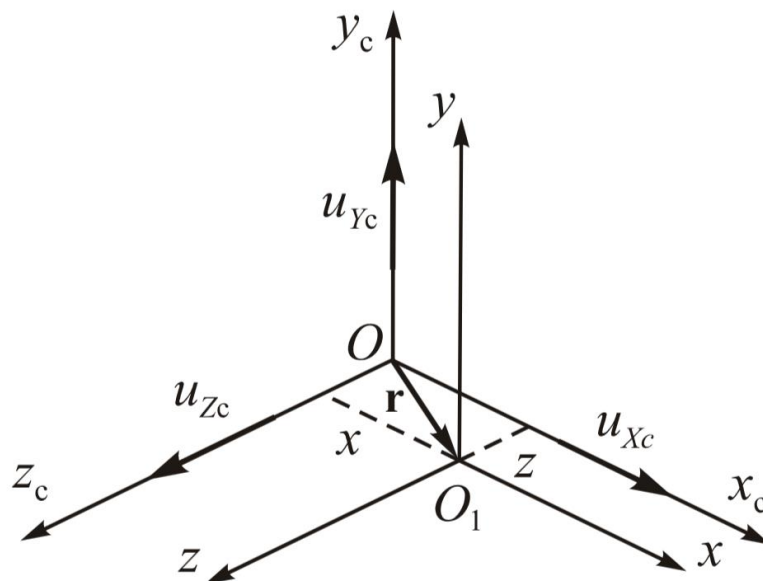


Рис.2.1. Кінематика ОБГ

Рівняння руху засновані на кілька більш загальній формі рівнянь Лагранжа другого порядку:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial T}{\partial q} + \frac{\partial \Pi}{\partial q} = Q_q - \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}}, \quad (2.1)$$

де Q_i – узагальнені сили; Φ – дисипативна функція, яку визначають за формулою:

$$\Phi = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 f_i \dot{q}_i^2,$$

де взяті в якості узагальнених координат: $q_1 = x$ рух в напрямку збудження коливання (вісь x) і $q_2 = z$ зміщення вздовж вимірювальної осі z .

Абсолютна лінійна швидкість інерційної маси визначається співвідношенням векторів $V = \dot{r} + u \times r$, або в проекціях на осі $O_1 x_c y_c z_c$:

$$V \{ \dot{x} + u_{yc} z; u_{zc} x - u_{xc} \dot{z}; \dot{z} - u_{yc} x \}. \quad (2.2)$$

Потенційна енергія пружної підвіски визначається за формулою:

$$\Pi = \frac{c_1}{2} x^2 + \frac{c_2}{2} z^2,$$

де c_1 і c_2 – жорсткості пружних в'язей у відповідних напрямках.

Кінетична енергія інерційної маси з урахуванням (2.2) має вираз:

$$T = \frac{m}{2} V^2 = \frac{m}{2} \left[(\dot{x} + u_{yc} z)^2 + (x u_{zc} - z u_{xc})^2 + (\dot{z} - u_{yc} x)^2 \right].$$

Виконуючи математичні операції відповідно до (2.1), отримуємо рівняння руху ОВГ з одномасового у вигляді:

$$m \ddot{x} + f_1 \dot{x} + \left[c_1 - m(u_{yc}^2 + u_{zc}^2) \right] x + 2m u_{yc} \dot{z} + m(\dot{u}_{yc} + u_{xc} u_{zc}) z = Q_1;$$

$$m \ddot{z} + f_2 \dot{z} + \left[c_2 - m(u_{yc}^2 + u_{xc}^2) \right] z - 2m u_{yc} \dot{x} - m(\dot{u}_{yc} + u_{xc} u_{zc}) x = Q_2,$$

або

$$\ddot{x} + 2h_1 \dot{x} + \left[k_1^2 - (u_{yc}^2 + u_{zc}^2) \right] x + 2u_{yc} \dot{z} + (\dot{u}_{yc} + u_{xc} u_{zc}) z = q_1;$$

$$\ddot{z} + 2h_2 \dot{z} + \left[k_2^2 - (u_{yc}^2 + u_{xc}^2) \right] z - 2u_{yc} \dot{x} - (\dot{u}_{yc} + u_{xc} u_{zc}) x = q_2, \quad (2.3)$$

де

$$\begin{aligned} 2h_1 &= f_1 / m; & 2h_2 &= f_2 / m; & k_1^2 &= c_1 / m; & k_2^2 &= c_2 / m; \\ q_1 &= Q_1 / m; & q_2 &= Q_2 / m. \end{aligned}$$

У рівнянні (2.3) портативна кутова швидкість u_{Yc} є параметром. Ось чому ці порівняння є порівняннями зі змінними коефіцієнтами.

За рівняння $u \approx const$ руху вони мають вигляд [1]:

$$\begin{aligned} \ddot{x} + 2h_1 \dot{x} + \left[k_1^2 - (u_{Yc}^2 + u_{Zc}^2) \right] x + 2u_{Yc} \dot{z} + u_{Xc} u_{Zc} z &= q_1; \\ \ddot{z} + 2h_2 \dot{z} + \left[k_2^2 - (u_{Yc}^2 + u_{Xc}^2) \right] z - 2u_{Yc} \dot{x} - u_{Xc} u_{Zc} x &= q_2. \end{aligned}$$

2.2. Вимушені коливання інерційної маси

Будемо вважати, що узагальнене прискорення $q_2 = -W_{Zc}$, а сила збудження Q_1 , створювана електростатичним приводом, спричиняє виникнення узагальненого прискорення, що змінюється за гармонічним законом

$$q_1(t) = q_{10} \sin \lambda t.$$

Розглянемо вторинний рух чутливого елемента ММГ за різних законів руху основи.

Нерухома основа. У цьому випадку переносна кутова швидкість $u = 0$, $W = 0$, і система диференціальних рівнянь руху (2.3) набуває вигляду:

$$\begin{aligned} \ddot{x} + 2h_1 \dot{x} + k_1^2 x &= q_1(t); \\ \ddot{z} + 2h_2 \dot{z} + k_2^2 z &= 0, \end{aligned} \tag{2.4}$$

тобто розпадається на два незалежні лінійні диференціальні рівняння другого порядку щодо узагальнених координат.

Загальним розв'язком сукупності рівнянь (2.4) будуть такі залежності узагальнених координат від часу

$$x(t) = A_1 e^{-h_1 t} \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + \frac{q_{10}}{\sqrt{(k_1^2 - \lambda^2) + 4h_1^2 \lambda^2}} \sin(\lambda t - \gamma)$$

$$z(t) = A_2 e^{-h_2 t} \sin(\omega_2 t + \varphi_2) \quad (2.5)$$

де $\omega_i = \sqrt{k_i^2 - h_i^2}$, постійні коефіцієнти A_i й φ_i визначаються початковими умовами, а фаза вимушених коливань γ зі співвідношення

$$\operatorname{tg} \gamma = 2h_1 \lambda (k_1^2 - \lambda^2).$$

При виконанні умови резонансного настроювання ($\lambda = \omega_1 \approx k_1$) розв'язок (2.5) за нульових початкових умов набуде вигляду

$$x(t) = \frac{q_{10}}{2h_1 \lambda} (1 - e^{-h_1 t}) \cos \lambda t + \frac{q_{10}}{2\lambda^2} e^{-h_1 t} \sin \lambda t; \quad z(t) = 0.$$

Отже, інерційна маса після загасання власних коливань буде здійснювати вимушені (первинні) коливання з амплітудою, пропорційною силі збудження, уздовж осі x_c , у той час, як вздовж напрямку осі z_c вона залишиться нерухомою.

$$x(t) = \frac{q_{10}}{2h_1 \lambda} \cos \lambda t; \quad z(t) = 0. \quad (2.6)$$

Характер руху інерційної маси під дією сили збудження показаний на рис. 2.2.

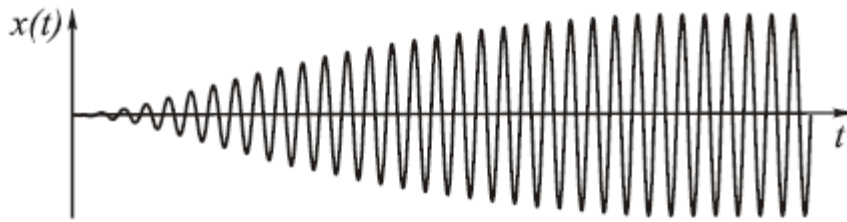


Рис. 2.2 Первинні коливання інерційної маси

2.3. Рух основи з постійною кутовою швидкістю

Розглянемо рух чутливого елемента ММГ за умови $u = \text{const}$ і $W_{Zc} = 0$. Для цього спочатку запишемо рівняння (14.54) в операторній формі, використовуючи оператор Лапласа p :

$$\begin{aligned} (p^2 + 2h_1 p + k_1^2 - u^2)x + 2upz &= q_1(p); \\ -2upz + (p^2 + 2h_2 p + k_2^2 - u^2)z &= 0; \end{aligned} \quad (2.7)$$

Розв'язок отриманих рівнянь в операторній формі:

$$x(p) = \frac{[p^2 + 2h_2p + (k_2^2 - u^2)]q_1(p)}{[p^2 + 2h_2p + (k_1^2 - u^2)][p^2 + 2h_2p + (k_2^2 - u^2)] + 4u^2p^2};$$

$$z(p) = \frac{2u[pq_1(p)]}{[p^2 + 2h_1p + (k_1^2 - u^2)][p^2 + 2h_2p + (k_2^2 - u^2)] + 4u^2p^2} \quad (2.8)$$

З урахуванням характеру змінювання $q_1(t) = q_{10} \sin \lambda t$ перетворимо розв'язки до вигляду

$$x(u) = A_{11}(\lambda, u)u \sin(\lambda t + \varphi_1)$$

$$z(u) = A_{21}(\lambda, u)u \sin(\lambda t + \varphi_2)$$

де

$$A_{11} = \frac{q_{10}\sqrt{(k_2^2 - \lambda^2 - u^2)^2 + 4h_2^2\lambda^2}}{\sqrt{\Delta^2}} = K_x(u, \lambda); \quad A_{21} = \frac{2q_{10}\lambda}{\sqrt{\Delta^2}} = K_z(u, \lambda)$$

– амплітудно-частотні характеристики;

$$\varphi_1 = \arctg \frac{2h_2\lambda}{k_2^2 - u^2 - \lambda^2} - \arctg \frac{2\lambda[h_1(k_2^2 - u^2 - \lambda^2) + h_2(k_1^2 - u^2 - \lambda^2)]}{(k_1^2 - u^2 - \lambda^2)(k_2^2 - u^2 - \lambda^2) - 4\lambda^2(h_1h_2 + u^2)};$$

$$\varphi_2 = \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{2\lambda[h_1(k_2^2 - u^2 - \lambda^2) + h_2(k_1^2 - u^2 - \lambda^2)]}{(k_1^2 - u^2 - \lambda^2)(k_2^2 - u^2 - \lambda^2) - 4\lambda^2(h_1h_2 + u^2)};$$

$$\Delta^2 = [\lambda^4 - (k_1^2 + k_2^2 + 2u^2 + 4h_1h_2)\lambda^2 + (k_1^2 - u^2)(k_2^2 - u^2)]^2 + 4\lambda^4[h_1(k_2^2 - u^2 - \lambda^2) + h_2(k_1^2 - u^2 - \lambda^2)]^2 \quad (2.9)$$

Як бачимо, рух чутливого елементу ММГ з координати z являє собою вторинні коливання із частотою сили збудження й амплітудою, яка залежить від величини проекції кутової швидкості обертання основи u на вісь чутливості y_c .

На практиці часто використовується резонансний режим збудження вимушених коливань, тобто виконується умова $k_I = \lambda$. При цьому зазвичай друга парціальна частота більша за першу парціальну частоту ($k_2 > k_1$). Графіки залежності амплітуди z_m вторинних коливань від кутової швидкості за частоти збудження $\lambda = k_I$ для різних значень відношення парціальних частот k_2/k_1 зображено на рис. 2.3.

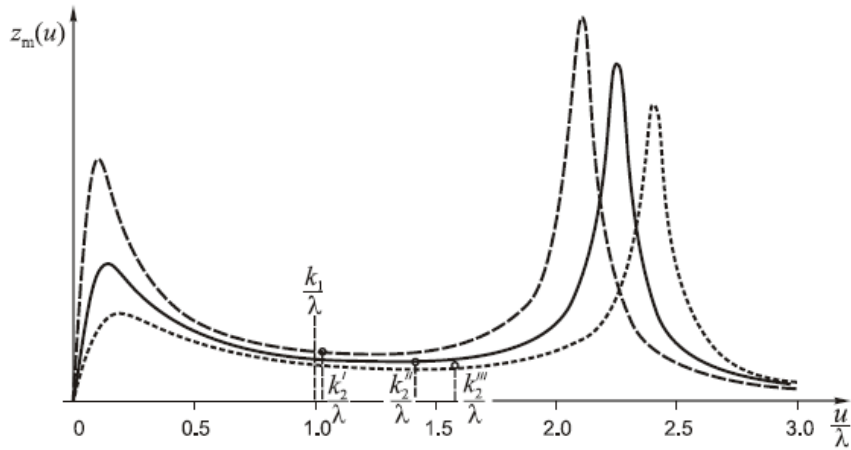


Рис. 2.3. Статичні характеристики ММГ

Як впливає з цих графіків, лінійна залежність амплітуди коливань від вимірюваної швидкості має місце на дуже обмеженій ділянці частот, яка значно менша від найменшої з парціальних частот (k_1). При цьому діапазон лінійної залежності тим менший, а крутизна характеристики тим більша, чим менша різниця парціальних частот k_2 і k_1 і менший коефіцієнт загасання первинних коливань. З урахуванням цього розглянемо більш докладно роботу ММГ при виконанні умови $u/\lambda \ll 1$.

Початкові ділянки статичних $z_m = f_x(u/\lambda)$ і фазових характеристик $\phi_2 = f(u/\lambda)$ для різних співвідношень парціальних частот ($k_2 = 1,05k_1$, $k_2 = 1,1k_1$ і $k_2 = 1,2k_1$) для $h_i = 0,0005k_i$ показано на рис. 2.4. Згідно з цими графіками вторинні коливання за малих вимірюваних швидкостей ($u/\lambda \leq 0,0005$) відбуваються практично у протифазі щодо сили збудження. Зі збільшенням відносної швидкості u/λ до одиниці зсув фаз наближується до 90° . Діапазон вимірювань ММГ визначається лінійною залежністю амплітуди вторинних коливань від вимірюваної кутової швидкості, яку можна отримати з формули (2.7), якщо $u = 0$:

$$K(0) = \frac{2q_1\lambda}{2h_1\lambda\sqrt{(k_2^2 - \lambda^2)^2 + 4h_2^2\lambda^2}} \approx \frac{q_1}{h_1(k_2^2 - \lambda^2)} \quad (2.10)$$

Лінійна залежність амплітуди вторинних коливань від вимірюваної швидкості для цього випадку показана на рис. 2.4, а пунктиром.

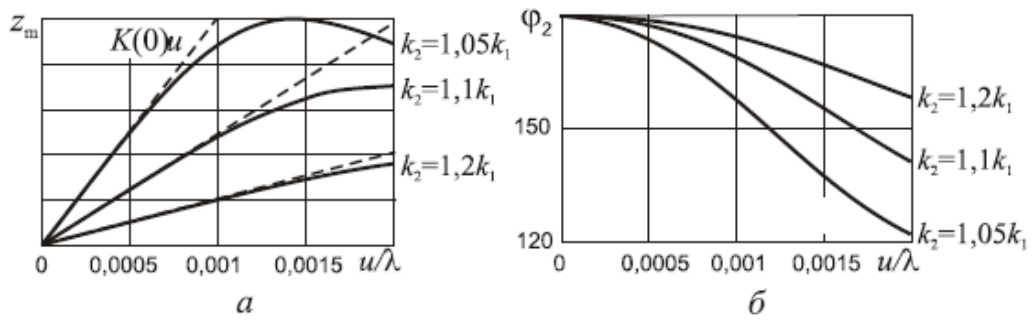


Рис. 2.4. Початкові ділянки амплітудної та фазової частотних характеристик

Ступінь відносної нелінійності коефіцієнта передачі можна визначити за формулою

$$\delta K(0) = \left| \frac{K(u) - K(0)}{K(0)} \right|.$$

Графік цієї нелінійності показано на рис. 2.5. При порівнянні цих графіків з рис. 2.4 видно, що зсув фаз вторинних коливань для однакової відносної нелінійності при різних співвідношеннях між парціальними частотами є однаковим.

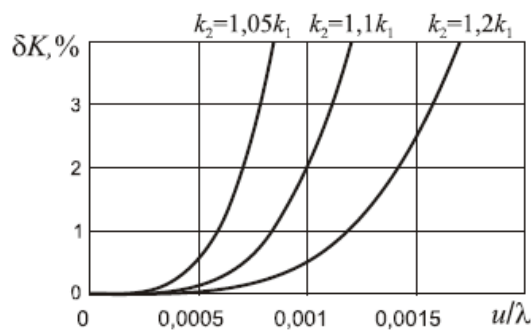


Рис. 2.5. Нелінійність коефіцієнта передачі

У реальних конструкціях частота збудження первинних коливань становить 3 – 15 кГц (9000 – 90000 1/с). Діапазон вимірюваної кутової швидкості для $\delta K \leq 0,5\%$ не перевищує 360°/с.

Така нелінійна залежність амплітуди вторинних коливань від вимірюваної кутової швидкості зумовлена впливом руху з координати z_c на рух по координаті x_c . Цей вплив здійснюється через гіроскопічний перехресний зв'язок (член $2u\dot{z}$ у першому рівнянні системи (2.3).

Залежності амплітуди й фази первинних коливань від вимірюваної кутової швидкості показано на рис. 2.6 а, б.

Як бачимо, за малих відносних кутових швидкостей обертання u λ вимушені коливання чутливого елемента в напрямку осі x_c відбуваються з постійною амплітудою, яка визначається переважно силою збудження Q_2 . Коливання зсунуті за фазою на 90° відносно цих сил. Вплив гіроскопічного перехресного зв'язку несуттєвий і ним можна знехтувати.

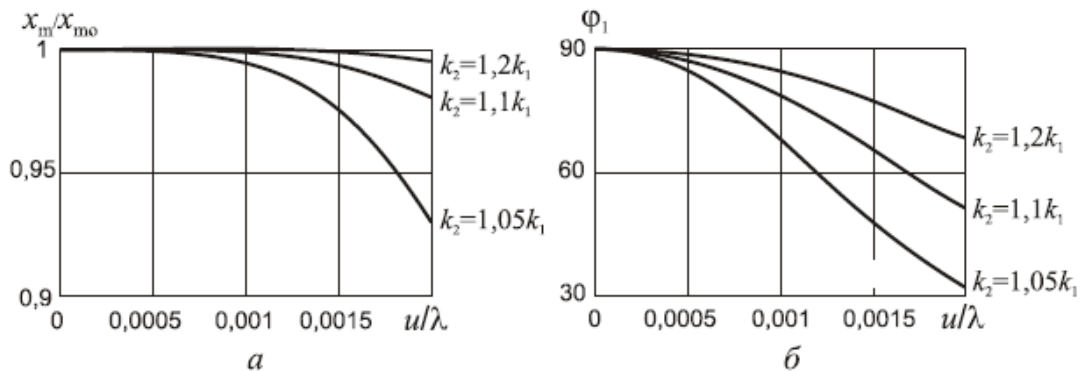


Рис. 2.6. Відносна амплітуда і фазовий зсув первинних коливань

Зменшити вплив гіроскопічного перехресного зв'язку при відносно великій швидкості обертання основи можна, застосовуючи системи автоматичного регулювання амплітуди первинних коливань.

2.4. Кутова вібрація основи.

Розглянемо рух чутливого елемента ММГ за кутової вібрації основи навколо вимірювальної осі y_c за законом $u = u_0 \sin \omega t$ із частотою ω , набагато меншої частоти первинних коливань λ й амплітудою u_0 , при якій можна знехтувати нелінійністю коефіцієнта передачі $K(u, \lambda)$.

Рух чутливого елемента подамо системою рівнянь:

$$\begin{aligned}\ddot{x} + 2h_1\dot{x} + k_1^2x &= q_{10} \sin \lambda t; \\ \ddot{z} + 2h_2\dot{z} + k_2^2z &= 2u_0\dot{x}\sin\omega t + u_0x\omega\cos\omega t\end{aligned}\quad (2.11)$$

Частинний розв'язок першого рівняння сукупності (2.11) співпадає з формулою (2.7):

$$x(t) = \frac{q_{10}}{2h_1\lambda} \cos \lambda t.$$

Швидкість первинного руху

$$\dot{x}(t) = \frac{q_{10}}{2h_1} \sin \lambda t.$$

З урахуванням значень $x(t)$ і $\dot{x}(t)$ запишемо рівняння руху чутливого елемента по координаті z у формі:

$$\ddot{z} + 2h_2\dot{z} + k_2^2z = -u_0 \frac{q_{10}}{h_1} \sin\omega t \sin\lambda t + u_0 \frac{q_{10}\omega}{2h_1\lambda} \cos\omega t \cos\lambda t$$

Зробивши заміну добутків тригонометричних функцій, отримаємо:

$$\ddot{z} + 2h_2\dot{z} + k_2^2z = \frac{q_{10}}{h_1} u_0 \left[\left(1 + \frac{\omega}{2\lambda}\right) \cos(\lambda + \omega) t - \left(1 - \frac{\omega}{2\lambda}\right) \cos(\lambda - \omega) t \right].$$

Частинний розв'язок одержаного рівняння має вигляд:

$$z = \frac{q_{10}}{h_1} u_0 \left[\frac{\left(1 + \frac{\omega}{2\lambda}\right) \cos[(\lambda + \omega)t + \varphi_1]}{\sqrt{[k_2^2 - (\lambda + \omega)^2]^2 + 4h_2^2(\lambda + \omega)^2}} - \frac{\left(1 - \frac{\omega}{2\lambda}\right) \cos[(\lambda - \omega)t + \varphi_1]}{\sqrt{[k_2^2 - (\lambda - \omega)^2]^2 + 4h_2^2(\lambda - \omega)^2}} \right], \quad (2.12)$$

$$\text{де } tg\varphi_1 = \frac{2h_2(\lambda + \omega)}{k_2^2 - (\lambda + \omega)^2}; \quad tg\varphi_2 = \frac{2h_2(\lambda - \omega)}{k_2^2 - (\lambda - \omega)^2}$$

У реальних конструкціях ММГ для забезпечення стабільності коефіцієнта передачі виконують умову

$$k_2^2 - (\lambda + \omega)^2 \gg h_2^2.$$

У цьому випадку можна припустити $\phi_1 \approx \phi_2 \approx 0$, що дозволяє істотно спростити вираз (2.12):

$$z \approx \frac{q_{10}}{2h_1} u_0 \left[\frac{\left(1 + \frac{\omega}{2\lambda}\right) \cos(\lambda + \omega) t}{k_2^2 - (\lambda + \omega)^2} - \frac{\left(1 - \frac{\omega}{2\lambda}\right) \cos(\lambda - \omega) t}{k_2^2 - (\lambda - \omega)^2} \right]$$

або після деяких перетворень

$$z = \frac{q_{10}}{2h_1} \frac{\left[(k_2^2 - \lambda^2) \sin \omega t \sin \lambda t - \frac{\omega}{2t} (3\lambda^2 + k_2^2 - \omega^2) \cos \omega t \cos \lambda t \right]}{(k_2^2 - \lambda^2)^2 - 2\omega^2 + (k_2^2 + \lambda^2) + \omega^4}$$

Отже, у вихідному сигналі ММГ є корисна складова, синфазна вимірюваній кутовій швидкості, і завада, зсунута по фазі на 90° відносно вимірюваної кутової швидкості (квадратурна складова сигналу). Одночасно корисний сигнал і сигнал завади зсунуті за фазою на 90° з частотою модуляції λ . [34]

Вигляд вторинних коливань для випадку $k_2 = 1,05\lambda$, $\omega = 0,01\lambda$ показано на рис. 2.7. Як видно, амплітуда квадратурної складової має значну величину за великої частоти коливань ω може навіть перевищувати амплітуду корисного сигналу.

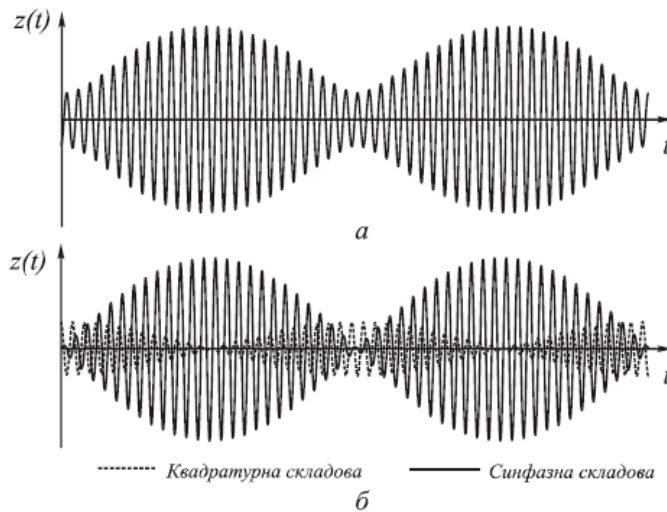


Рис. 2.7. Вторинні коливання за змінної швидкості основи

Однак зсув її за фазою на кут 90° на частоті модуляції дозволяє легко вирізнити корисну інформацію на фоні завади.

Подамо інформаційну складову сигналу у вигляді:

$$z = -K(0) \cdot K^*(\omega) \cdot u_0 \sin \omega t \sin \lambda t,$$

де $K(0)$ – статичний коефіцієнт передачі, визначений формулою;

$$K^*(\omega) = \frac{1}{\frac{\omega^4}{(k_2^2 - \lambda^2)^2} - 2 \frac{\omega^2}{k_2^2 - \lambda^2} \cdot \frac{k_2^2 + \lambda^2}{k_2^2 - \lambda^2} + 1} - \text{коефіцієнт динамічності.}$$

Вважаючи частоту коливань ω досить малою порівняно з модулем різниці

частот k_2 й λ , тобто припустивши $\varepsilon = \frac{\omega^2}{k_2^2 - \lambda^2} \ll 1$, подамо коефіцієнт динамічності у вигляді розкладання за малим параметром ε .

$$K^*(\omega) \approx 1 + 2(\lambda^2 + k_2^2) \left(\frac{\omega}{k_2^2 - \lambda^2} \right)^2$$

З урахуванням цього інформативну складову вторинних коливань можна подати у вигляді

$$z \approx \frac{q_{10} u_0}{h_1 (k_2^2 - \lambda^2)} \cdot \left[1 + \frac{2(\lambda^2 + k_2^2)}{(k_2^2 - \lambda^2)} \omega^2 \right] \sin \omega t \sin \lambda t.$$

Відносна похибка коефіцієнта передачі, зумовлена коливальним характером руху основи з частотою ω , дорівнює

$$\delta K(\omega) = |1 - K^*(\omega)| \cdot 100\% = \frac{2(\lambda^2 + k_2^2)}{(k_2^2 - \lambda^2)^2} \omega^2 \cdot 100\%.$$

Залежність величини $\delta K(\omega)$ від відносної частоти ω/λ кутового руху основи при різних значеннях відносини парціальних частот показана на рис.2.8.[35]

Із графіків видно, що зменшення відношення k_2/k_1 при $k_1 = \lambda$ приводить до істотного збільшення відносної похибки, тобто до зменшення динамічного діапазону вимірів. Так, зменшення відношення частот з 1,2 до 1,05 за припустимої нелінійності характеристики 1% зменшує динамічний діапазон учетверо – з $\omega_{\max} = 0,02\lambda$ до $\omega_{\max} = 0,005\lambda$. Водночас, відповідно до формули (2.7), коефіцієнт передачі збільшується більш ніж у четверо.

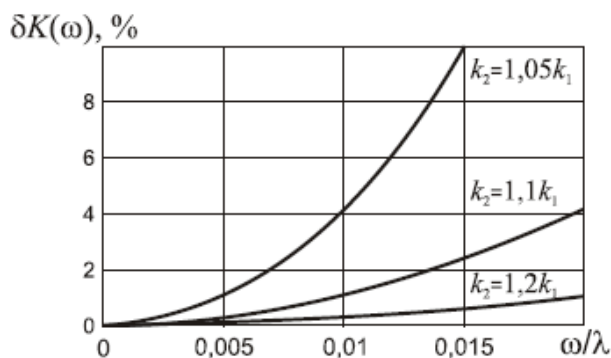


Рис. 2.8. Частотна характеристика ММГ

2.5. Вплив поступальних прискорень

Дослідимо рух чутливого елемента ММГ, встановленого на основі, яка одночасно здійснює кутовий рух з постійною кутовою швидкістю $u\{0, U, 0\}$ та поступальний рух з прискоренням $W\{W_{xc}, 0, W_{zc}\}$. Рівняння руху чутливого елемента у цьому разі мають вигляд:

$$\begin{aligned}\ddot{x} + 2h_1\dot{x} + (k_1^2 - u^2)x + 2u\dot{z} &= -W_{xc}; \\ \ddot{z} + 2h_2\dot{z} + (k_2^2 - u^2)z - 2u\dot{x} &= q_2 - W_{zc}\end{aligned}\quad (2.13)$$

Система рівнянь лінійна, тому для її розв'язання скористаємось принципом суперпозиції. Візьмемо до уваги те, що на чутливий елемент діють також сили збудження з частотою λ . Тоді вплив поступального прискорення на рух чутливого елемента буде являти собою частинний розв'язок системи рівнянь

$$\begin{aligned}\ddot{x} + 2h_1\dot{x} + (k_1^2 - u^2)x + 2u\dot{z} &= -W_{xc}; \\ \ddot{z} + 2h_2\dot{z} + (k_2^2 - u^2)z - 2u\dot{x} &= -W_{zc}.\end{aligned}$$

який в разі $W_{xc} = \text{const}$, $W_{zc} = \text{const}$ становить

$$x_0 = -\frac{W_{xc}}{k_1^2 - u^2} \approx -\frac{W_{xc}}{k_1^2}; \quad z_0 = -\frac{W_{zc}}{k_2^2 - u^2} \approx -\frac{W_{zc}}{k_2^2}.$$

Отже, реакцією чутливого елемента на постійне прискорення буде його зміщення у протилежний бік дії цього прискорення.

Характер руху інерційної маси під дією прискорення W_{zc} показаний на рис. 2.9.

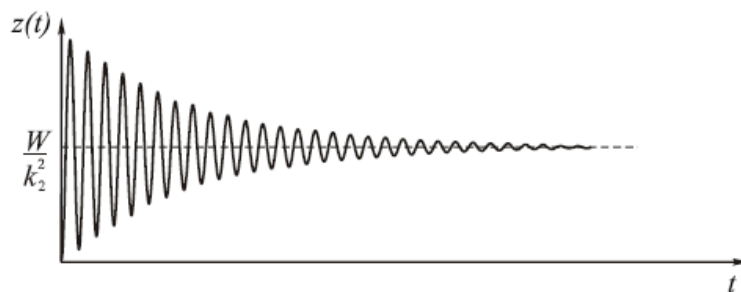


Рис. 2.9. Рух інерційної маси при дії лінійного прискорення

У разі поступальної вібрації основи рух чутливого елемента гіроскопа можна подати системою диференціальних рівнянь (2.13), у яких

$$W_{xc} = W_{x0} \cos \omega t, \quad W_{zc} = W_{z0} \cos \omega t$$

Скористаємося принципом суперпозиції. Частинні розв'язки системи диференціальних рівнянь руху чутливого елемента знаходимо у вигляді:

$$\begin{aligned} x(p) &= \frac{[p^2 + 2h_2p + (k_2^2 - u^2)][-W_{xc}(p) + q_1(p)] + 2upW_{zc}(p)}{[p^2 + 2h_1p + (k_1^2 - u^2)][p^2 + 2h_2p + (k_2^2 - u^2)] + 4u^2p^2} \\ z(p) &= \frac{[p^2 + 2h_1p + (k_1^2 - u^2)]W_{zc}(p) + 2up[q_1(p) - W_{xc}(p)]}{[p^2 + 2h_1p + (k_1^2 - u^2)][p^2 + 2h_2p + (k_2^2 - u^2)] + 4u^2p^2} \end{aligned} \quad (2.14)$$

З урахуванням характеру змінювання лінійних прискорень знайдемо вираз для амплітуди вторинних коливань, зумовлених поступальною вібрацією основи:

$$K_z(W, \omega) = \frac{\sqrt{(k_1^2 - u^2 - \omega^2)^2 W_{z0}^2 + 4\omega^2(h_1 W_{z0} + u w_{x0})^2}}{\sqrt{\Delta^2(u \cdot w)}},$$

де $\Delta^2(u \cdot w)$ визначаємо аналогічно :

$$\begin{aligned} \Delta^2(u \cdot w) &= [(k_1^2 - u^2 - \omega^2)(k_2^2 - u^2 - \omega^2) - 4\lambda^2(h_1 h_2 + u^2)]^2 \\ &\quad + 4\lambda^2[h_1(k_2^2 - u^2 - \omega^2) + h_2(k_1^2 - u^2 - \omega^2)]^2 \end{aligned}$$

Коливання чутливого елемента, спричинені поступальною вібрацією, відбуватимуться на частоті вібрації основи.

Графік вторинних коливань інерційної маси ММГ при постійній кутовій швидкості $u = u_0$ та гармонічно змінюваного лінійного прискорення $W_{zc} = W_{z0} \cos \omega_2 t$ показано на рис. 2.10.

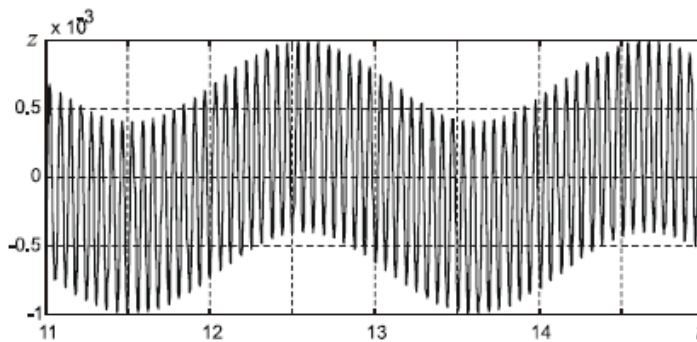


Рис. 2.10. Рух інерційної маси під час обертання та вібрації основи

Графік вторинних коливань інерційної маси за гармонічно змінюваних кутової швидкості $u = u_0 \cos \omega_1 t$ та лінійного прискорення $W_{zc} = W_{z0} \cos \omega_2 t$ показано на рис. 2.11.

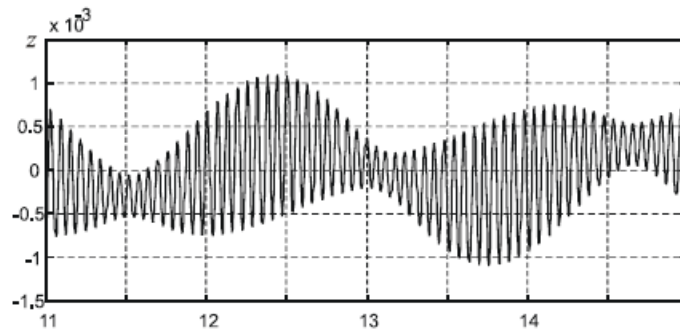


Рис. 2.11. Рух інерційної маси за кутової та лінійної вібрації основи

Якщо частота вібрації основи дорівнює частоті збудження λ , то амплітуда вторинних коливань інерційної маси

$$K_z(W, \omega) = \frac{\sqrt{(k_1^2 - u^2 - \omega^2)^2 W_{z0}^2 + 4\lambda^2 (h_1 W_{z0} + u W_{xo})^2}}{\sqrt{\Delta^2}}$$

Відношення амплітуди коливань, спричинених вібрацією основи, до амплітуди корисних коливань позначимо через δK_z і визначимо у такий спосіб

$$\delta K_z = \frac{K_z(W, \lambda)}{K_z(u, \lambda)} = \frac{\sqrt{(k_1^2 - u^2 - \omega^2)^2 W_{z0}^2 + 4\lambda^2 (h_1 W_{z0} + u W_{xo})^2}}{2\lambda q_{10} u}.$$

Тут $K_z(u, \lambda)$ визначається формулами (14.53).

Розглянемо вплив окремих складових лінійної вібрації на відносну похибку. У разі дії лінійного прискорення вздовж осі x_c первинних коливань відносна похибка вимірювань кутової швидкості згідно з формулою (2.14) буде становити:

$$\delta K_z(W_{xc}) = \frac{W_{xo}}{q_{10}},$$

тобто залежить тільки від відношення амплітуд вібрації та прискорення збудження.

Графіки вторинних коливань, якщо $W_{xc} = 0$ та $W_{xc} = 0,5q_{10}$, показано на рис. 2.12.

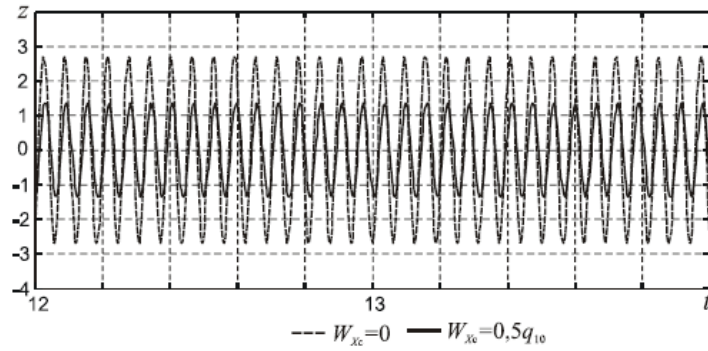


Рис. 2.12. Рух інерційної маси за вібрації основи вздовж осі первинних коливань

У разі лінійного прискорення вздовж осі z_c вторинних коливань відносна похибка вимірювань кутової швидкості згідно формули (2.14) за умови $k_1^2 = \lambda^2$ становитиме

$$\delta K_z(W_{zc}) = \frac{K_z(W_{z0})}{K_z(u)} = \frac{W_{z0} \sqrt{u^4 + 4\lambda^2 h_1^2}}{2\lambda u q_{10}}, \quad (2.15)$$

Уведемо позначення $\xi_1 = \frac{n_1}{\lambda}$; $\nu = \frac{u}{\lambda}$, з урахуванням яких формулу (2.15) подамо у вигляді

$$\delta K_z(W_{zc}) = \frac{W_{z0} \lambda \sqrt{\nu^4 + 4\xi_1^2}}{2q_{10}\nu}$$

Як випливає з цієї формули, відносна похибка суттєво залежить від значення вимірюваної кутової швидкості. [36]

Якщо частота вібрації основи не збігається з робочою частотою ММГ λ , то за фільтрації вихідного сигналу датчика на робочій частоті, коливання від вібрації можуть бути відфільтровані.

Одним з ефективних методів розділення сигналів кутової швидкості та лінійного прискорення є використання диференціальних схем побудови ММГ, яка складається з двох однакових чутливих елементів, первинні коливання яких збуджуються в протифазі (рис. 2.13).

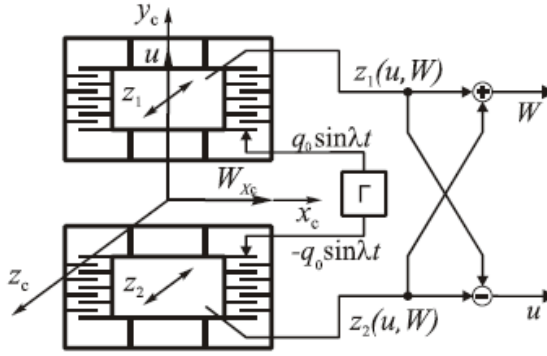


Рис. 2.13. Схема ММГ з диференціальним виходом

Вихідні сигнали z_1 , z_2 двох чутливих елементів з урахуванням того, що первинні коливання x_1 , x_2 здійснюються зі зсувом фаз 180° можна записати так:

$$z_1(p) = \frac{[p^2 + 2h_{11}p + (k_{11}^2 - u^2)]W_{zc}(p) + 2up[q_{11}(p) - W_{xc}(p)]}{[p^2 + 2h_{11}p + (k_{11}^2 - u^2)][p^2 + 2h_{21}p + (k_{21}^2 - u^2)] + 4u^2p^2}$$

$$z_2(p) = \frac{[p^2 + 2h_{12}p + (k_{12}^2 - u^2)]W_{zc}(p) + 2up[q_{12}(p) - W_{xc}(p)]}{[p^2 + 2h_{12}p + (k_{12}^2 - u^2)][p^2 + 2h_{22}p + (k_{22}^2 - u^2)] + 4u^2p^2}$$

У разі виконання умов $h_{11} = h_{12} = h_1$; $h_{21} = h_{22} = h_2$; $k_{11} = k_{12} = k_1$; $k_{21} = k_{22} = k_2$; $q_{11} = q_{12} = q_1$ сумарний сигнал двох чутливих елементів буде таким[37]

$$z_1(p) + z_2(p) = \frac{2[p^2 + 2h_1p + (k_1^2 - u^2)]W_{zc}(p) - 4upW_{xc}(p)}{[p^2 + 2h_1p + (k_1^2 - u^2)][p^2 + 2h_2p + (k_2^2 - u^2)] + 4u^2p^2}$$

$$z_2(p) - z_1(p) = \frac{4up[pq_1(p)]}{[p^2 + 2h_1p + (k_1^2 - u^2)][p^2 + 2h_2p + (k_2^2 - u^2)] + 4u^2p^2}$$

Розглянемо окремо результати обробки вихідних сигналів. Графік вторинних коливань інерційної маси за гармонічно змінюваних кутової швидкості $u = u_0 \cos \omega_1 t$ та лінійного прискорення $W_{zc} = W_{z0} \cos \omega_2 t$ було показано на рис. 2.11.

Результати обробки цього вихідного сигналу ММГ при використанні диференціальної схеми зображено на рис. 2.14.

Вихідний сигнал ММГ за спільної дії кутової швидкості $u = u_0 \cos \omega_1 t$ та лінійної вібрації $W_{zc} = W_{z0} \cos \lambda t$, частота якої дорівнює частоті збудження первинних коливань, зображено на рис. 2.15.

На рис. 2.16. наведені результати обробки такого вихідного сигналу ММГ при використанні диференціальної схеми побудови. Отже, вирахування вихідних

сигналів дозволяє одночасно позбутися впливу обох складових лінійних прискорень W_{Zc} та W_{Xc} .

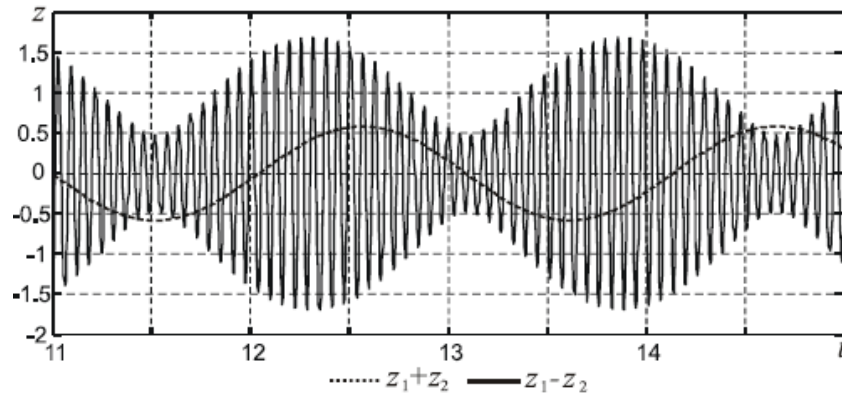


Рис. 2.14. Вихідні сигнали ММГ з диференціальним виходом

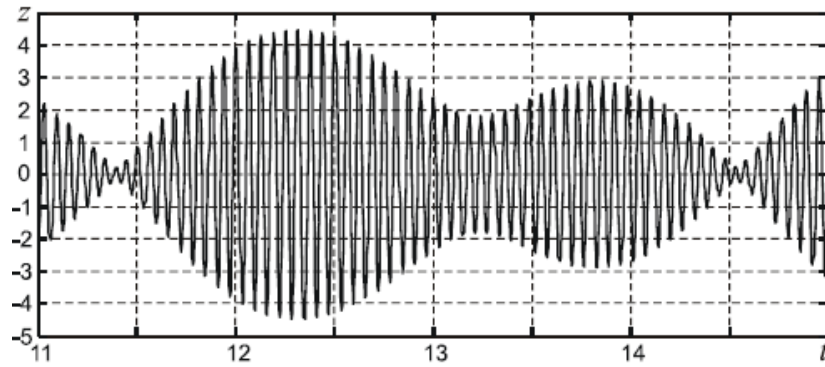


Рис. 2.15. Вихідний сигнал ММГ з при вібрації основи

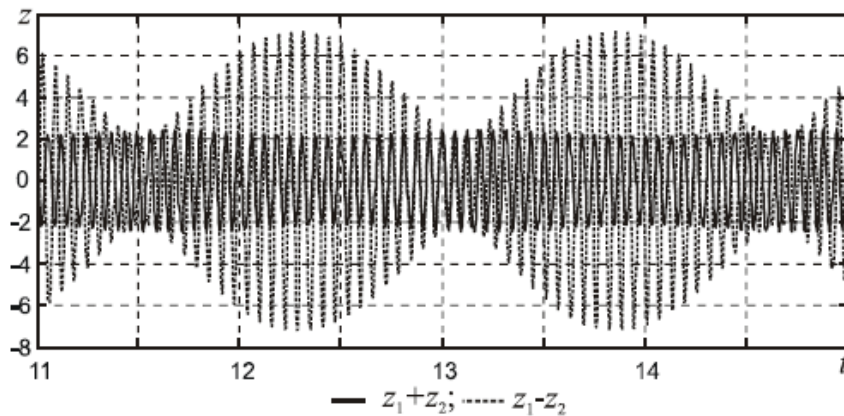


Рис. 2.16. Вихідні сигнали ММГ з диференціальним виходом при вібрації основи

Легко побачити, що використання диференціальних схем побудови ММГ дозволяє як ефективно позбутися впливу лінійних прискорень та вібрацій на

корисну складову вихідного сигналу, так і застосовувати ММГ як комплексний вимірювач двох параметрів руху – кутової швидкості та лінійного прискорення[38].

2.6. Розробка тривимірної моделі

Пристрої МЕМС часто працюють в умовах високої вібрації, тому рекомендується проектувати багатомасові чутливі елементи. Модель ММГ, представлена на малюнку 1.5, була прийнята за основу, але був доданий додатковий пружний елемент, який з'єднував рухомі рамки і синхронізував частоти коливань.

Була розроблена тривимірна модель двомасових мікромеханічного гіроскопа типу L-L в SolidWorks. Конструкція виконана з приблизними розмірами чутливих елементів. На рис 2.2 показана тривимірна модель типу ММГ L-L.

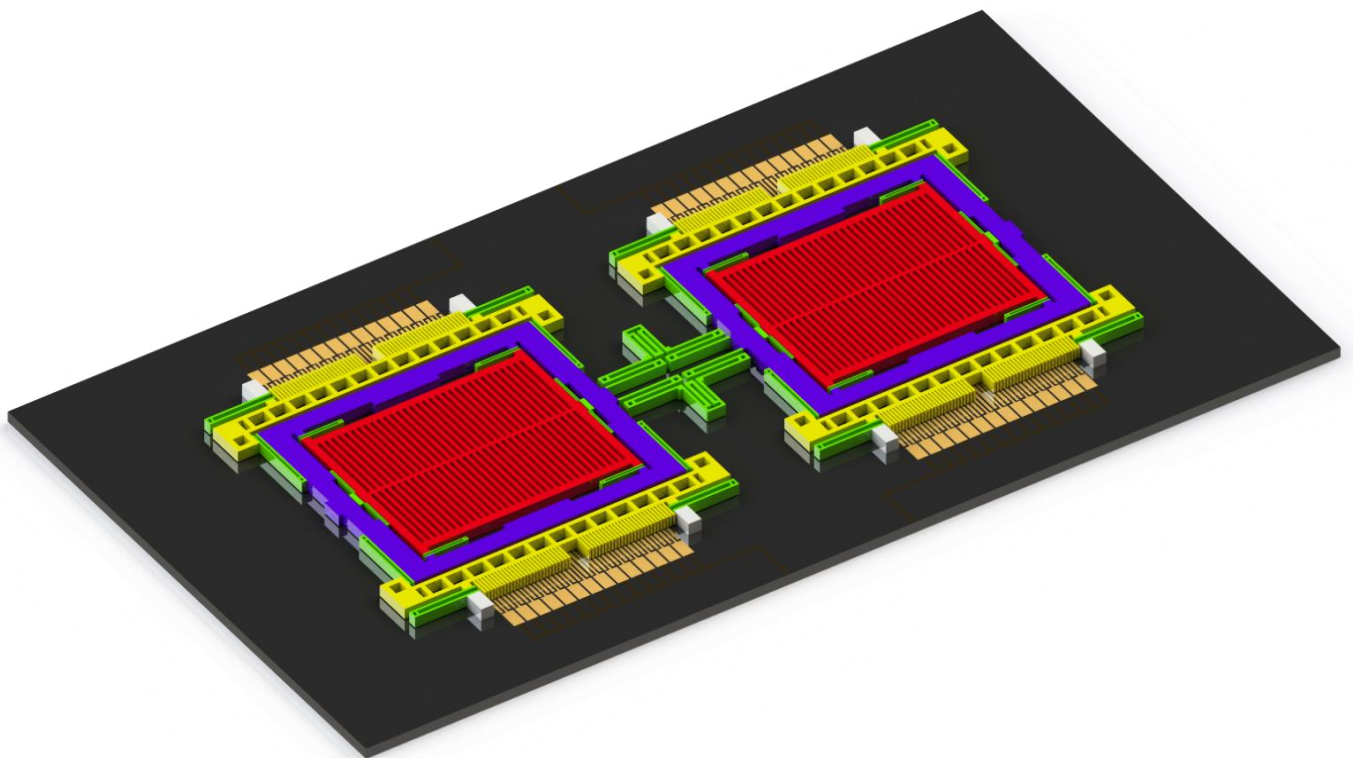


Рис.2.17.Складальний макет гіроскопа

Нижче представлені окремі компоненти гіроскопа на рис.2.3 – 2.8.

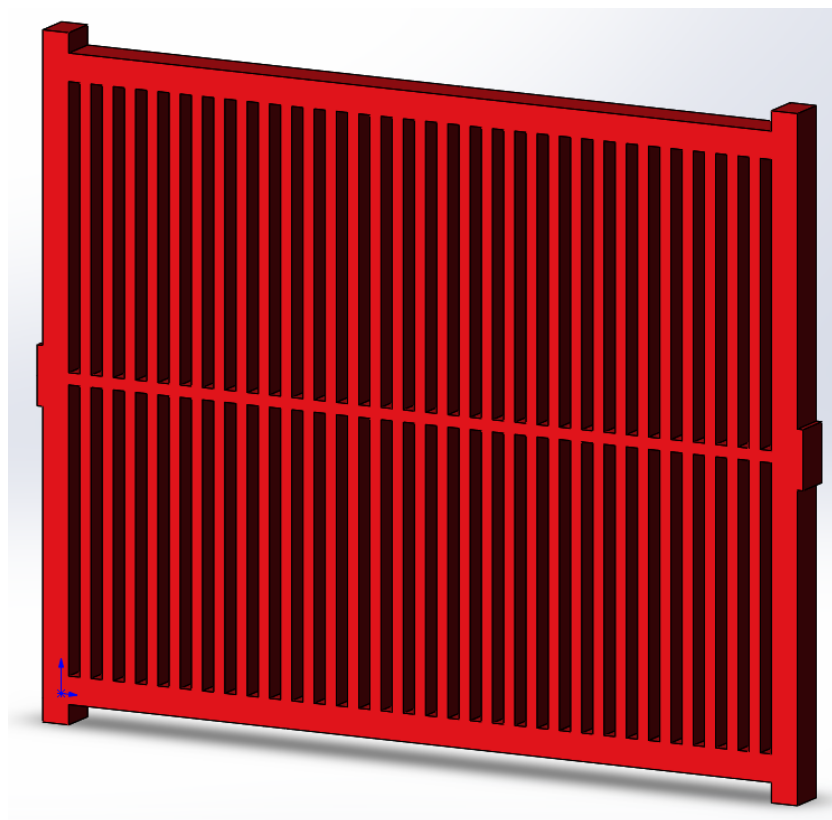


Рис. 2.18 Інерційна маса.

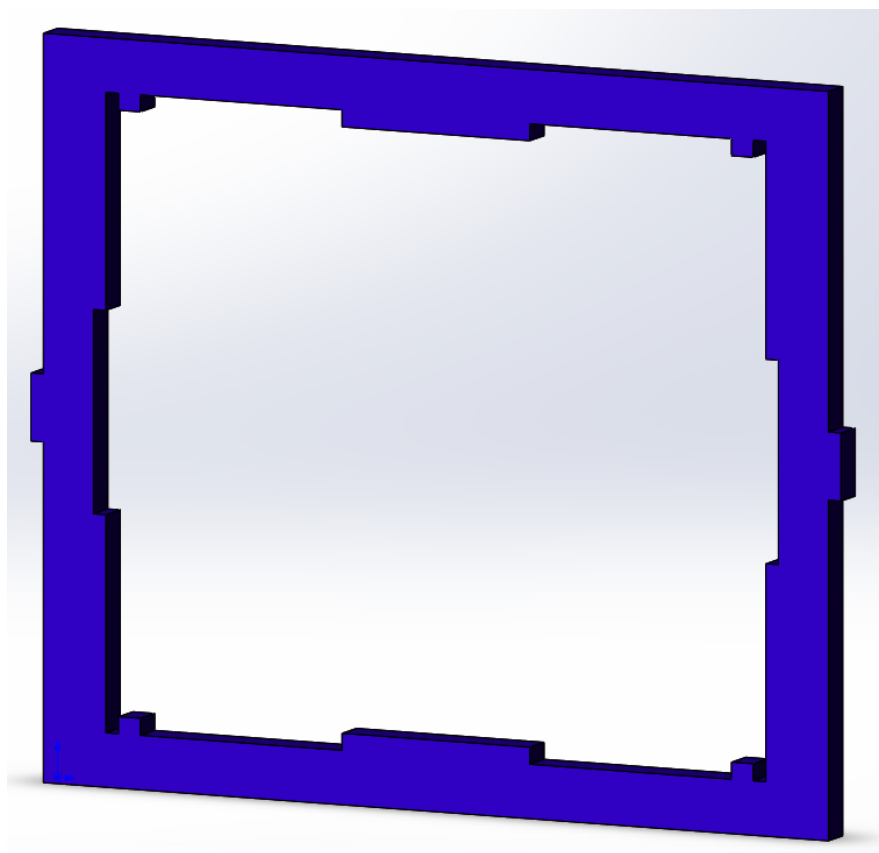


Рис. 2.19 Рамка

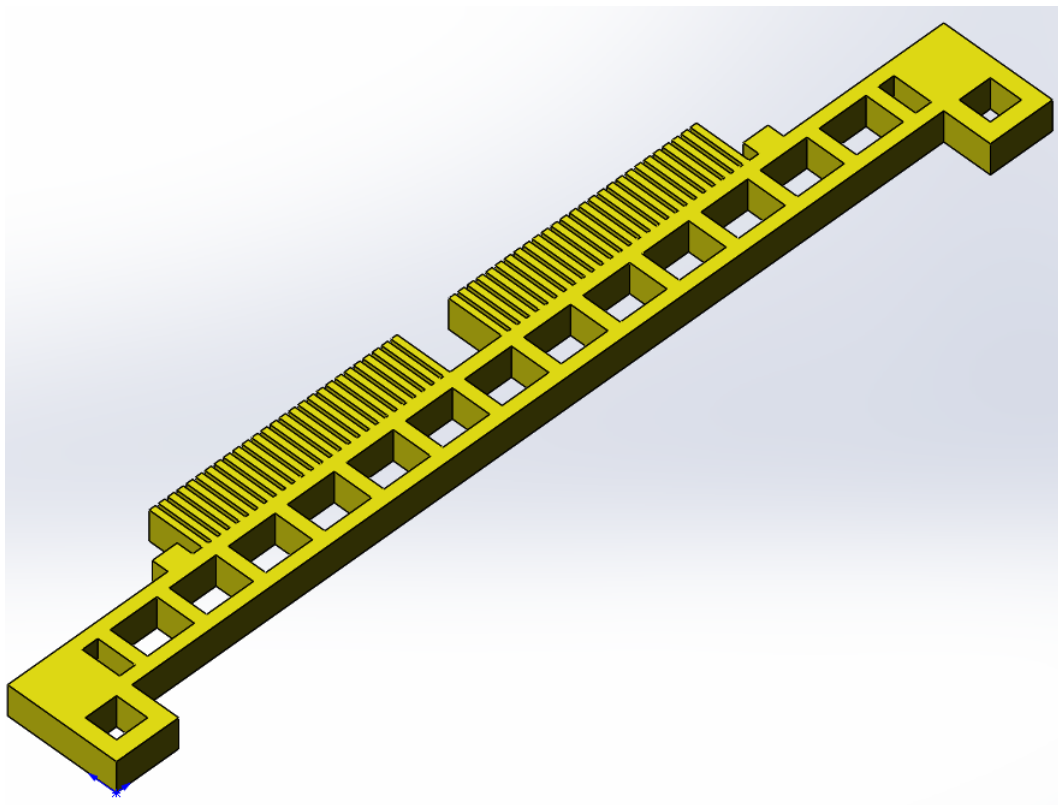
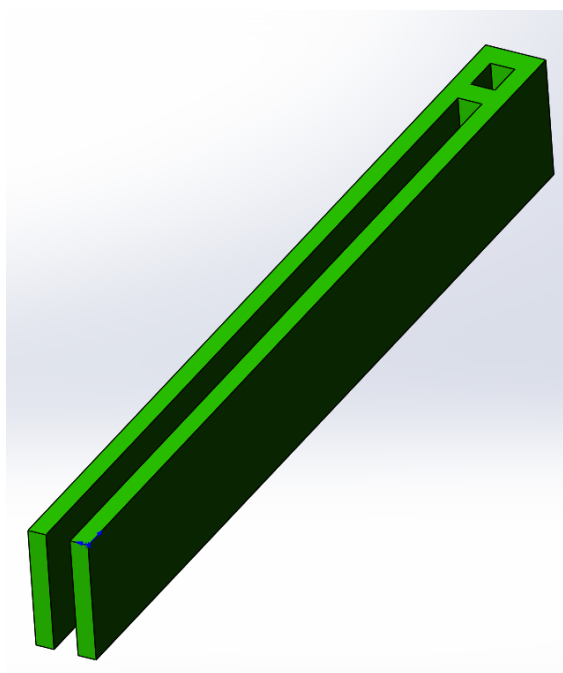
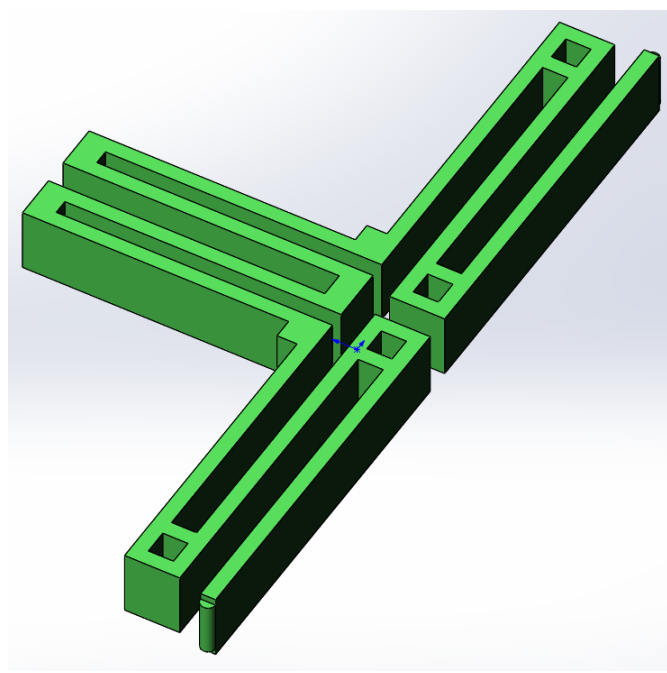


Рис. 2.20 Рамка приводу



а)



б)

Рис. 2.21. Пружні елементи: а) інерційної маси; б) рухомої рамки

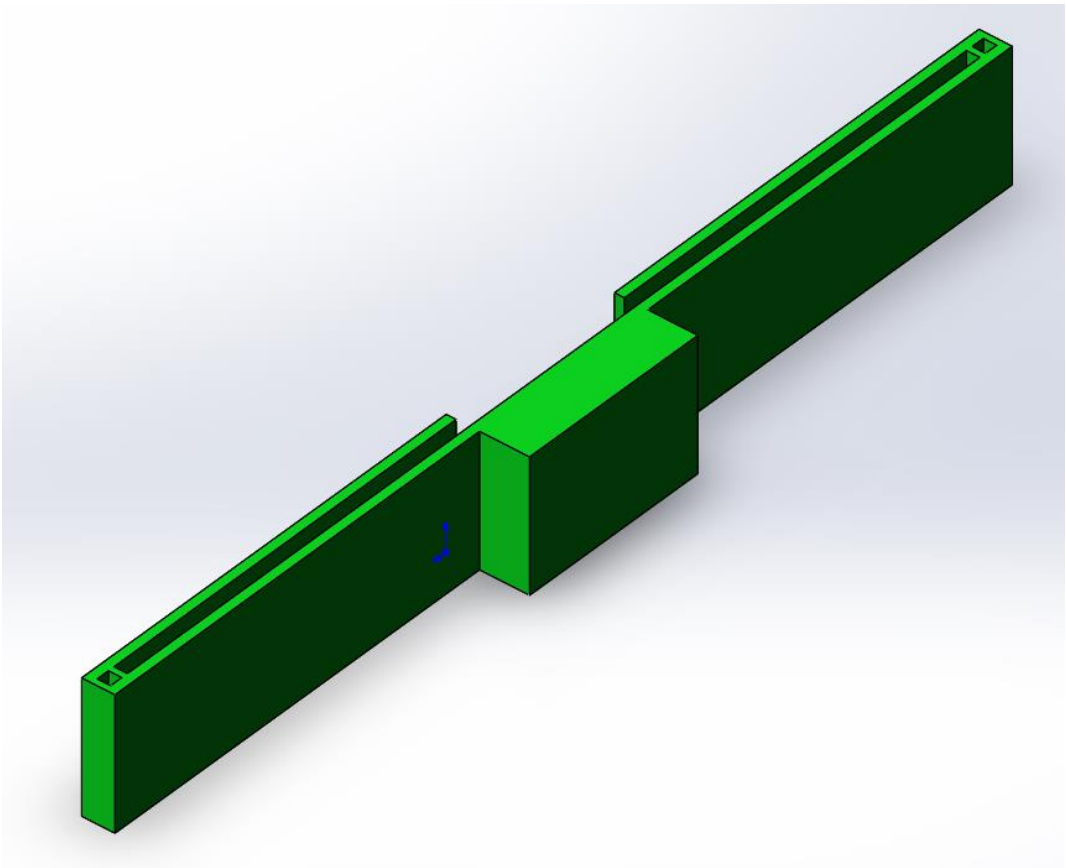


Рис. 2.22. Обмежувач інерційної маси

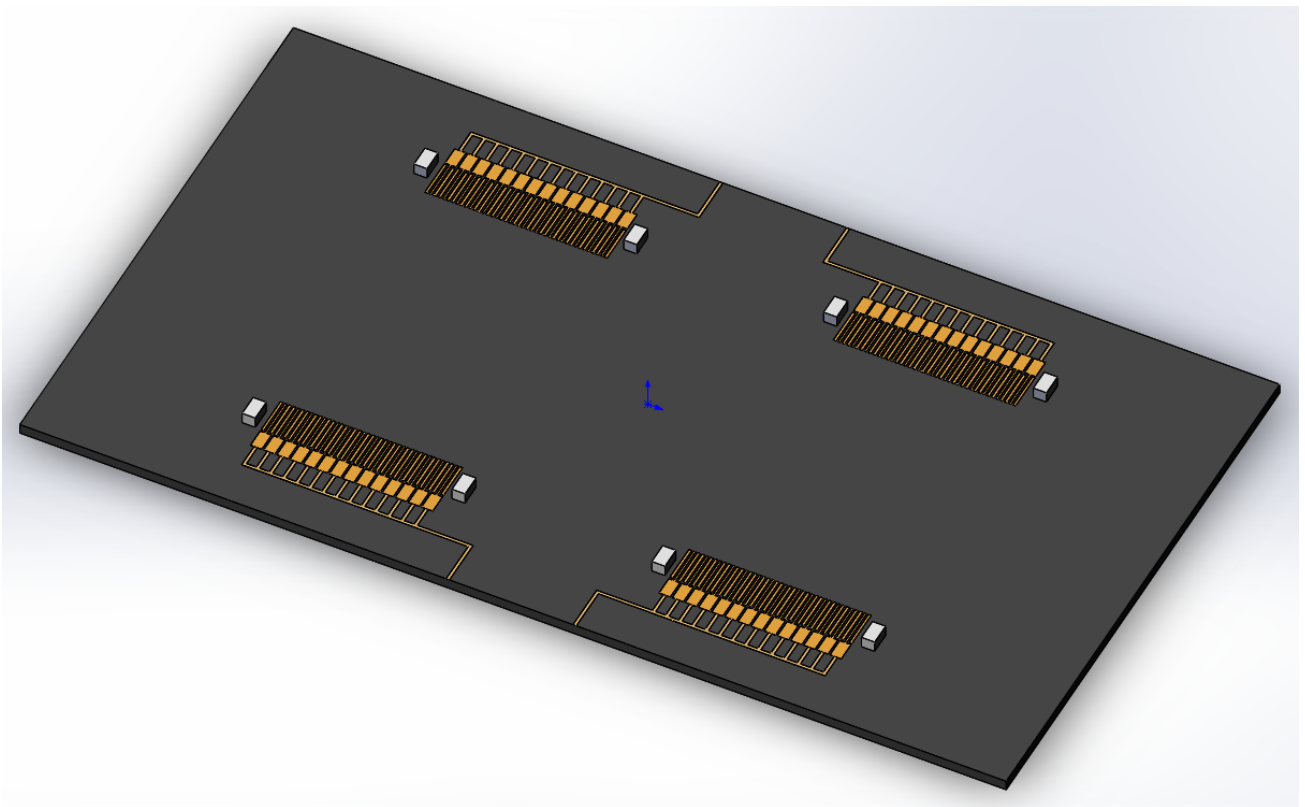


Рис. 2.23. Підкладка

2.7. Розрахунок пружних елементів

Розрахуємо пружні елементи, показані на рис.2.6. Для розрахунку пружин береться формула[39]:

$$C = \frac{bh^3}{12} \frac{12E}{l^3} \quad (2.4)$$

де h – висота, b – ширина, l – довжина, E – модуль пружності.

Модуль пружності для кремнію становить $E = 109 \cdot 10^9 \text{ Па}$. Геометричні розміри пружини ЧЕ рис.2.6 а) наступні:

$$h_1 = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$b_1 = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м} ,$$

$$l_1 = 3.6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Розрахуємо жорсткість пружини рухомої рамки за формулою (2.4):

$$C_1 = \frac{2 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-9}}{12} \frac{12 \cdot 109 \cdot 10^9}{3.6 \cdot 10^{-9}} = 2.4 \cdot 10^5 \text{ Нм}^2,$$

Аналогічно розрахуємо жорсткість пружних елементів інерційної маси:

$$h_2 = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$b_2 = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м} ,$$

$$l_2 = 4.5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$C_2 = \frac{10^{-4} \cdot 10^{-9}}{12} \frac{12 \cdot 109 \cdot 10^9}{4.5 \cdot 10^{-9}} = 2.34 \cdot 10^5 \text{ Нм}^2$$

2.8. Аналіз пружних елементів

Використання програмного пакету SolidWorks дозволяє провести аналіз деформації пружних елементів підвісу ММГ. Аналіз проводився на створеній тривимірній моделі приладу.

За допомогою додатку Flow Simulation в програмному середовищі SolidWorks, був проведений аналіз деформацій при робочих коливаннях ІМ. У якості вхідної дії для цього аналізу було збережено результати програмного моделювання ММГ із

середовища Matlab Simulink. Вихідні вектори значень первинних і вторинних коливань були імпортовані в .xls файли. Нижче на рис. 2.24 – 2.26 приведені результати моделювання.

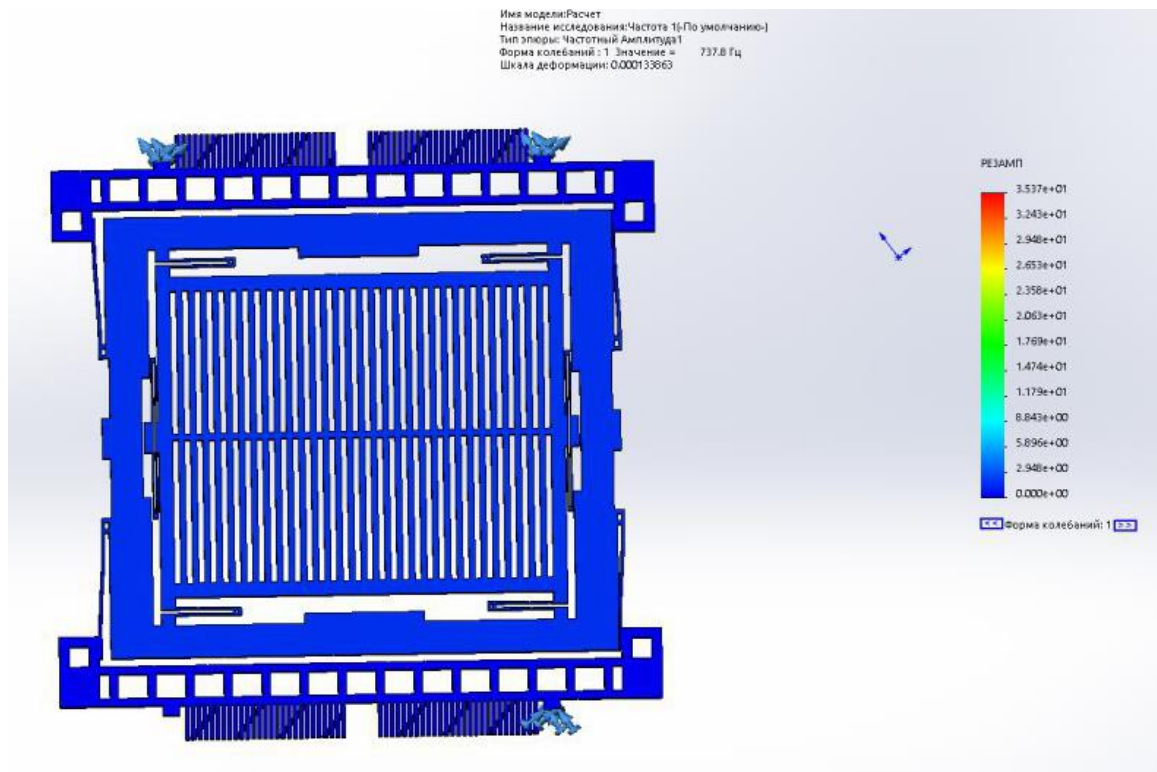


Рис. 2.24. Епюра деформацій пружних елементів ММГ по осі X.

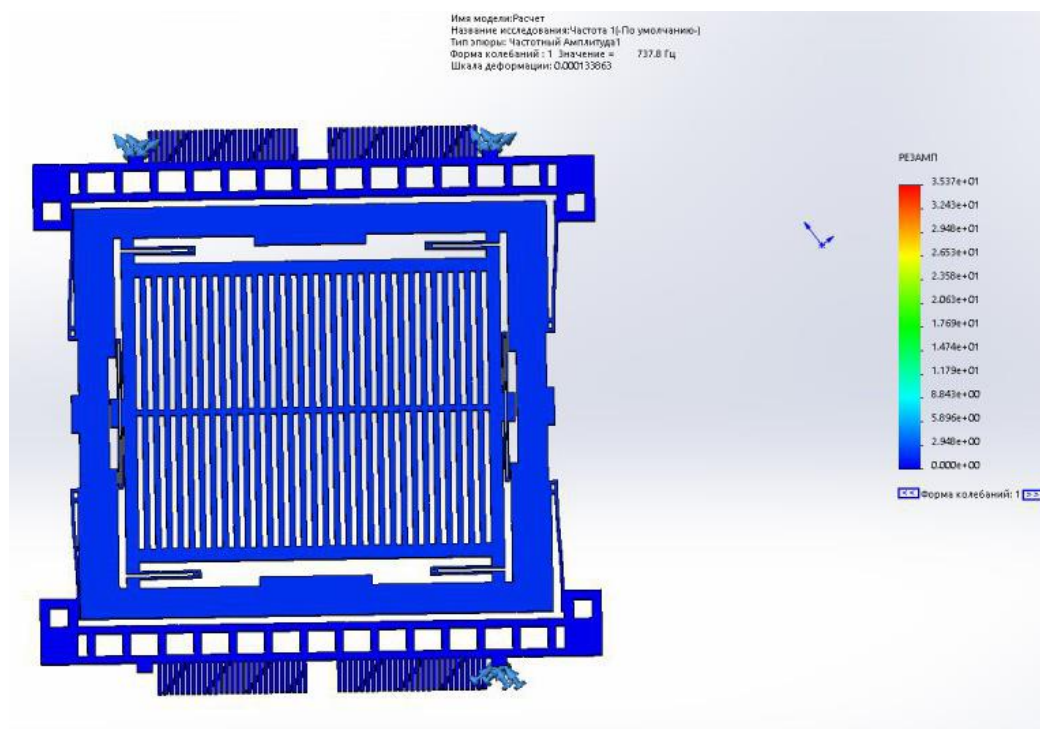


Рис. 2.25. Епюра деформацій пружних елементів ММГ по осі X.

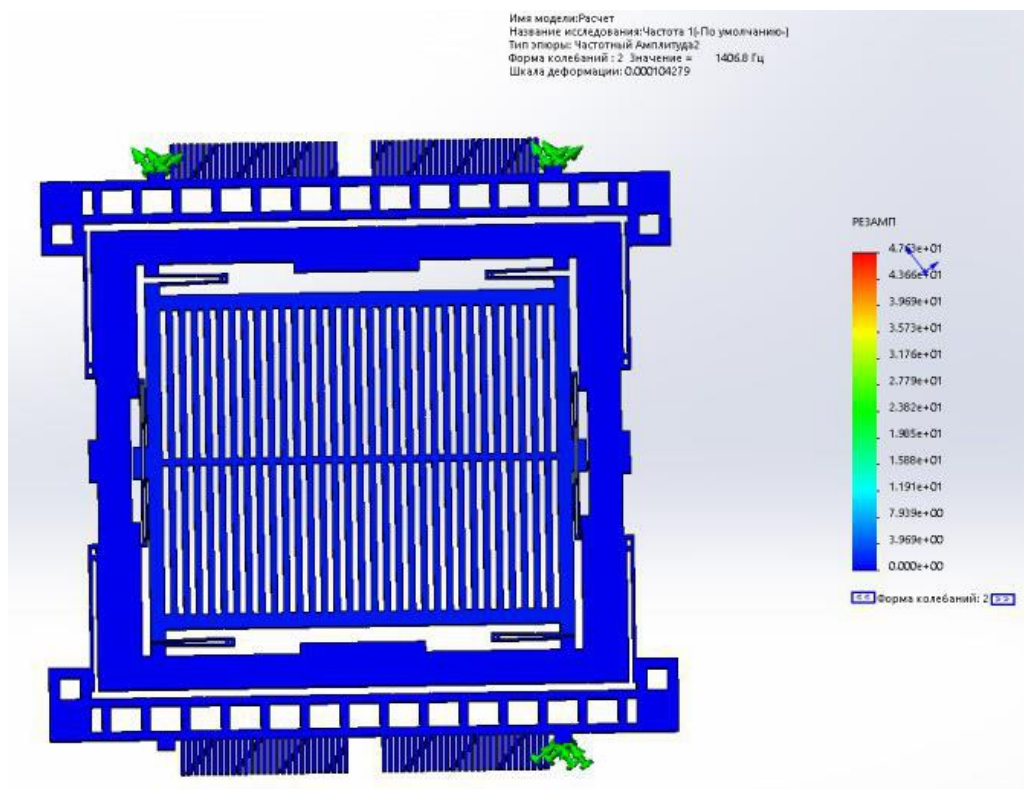


Рис. 2.26. Епюра деформаций пружних елементів ММГ по осі Y.

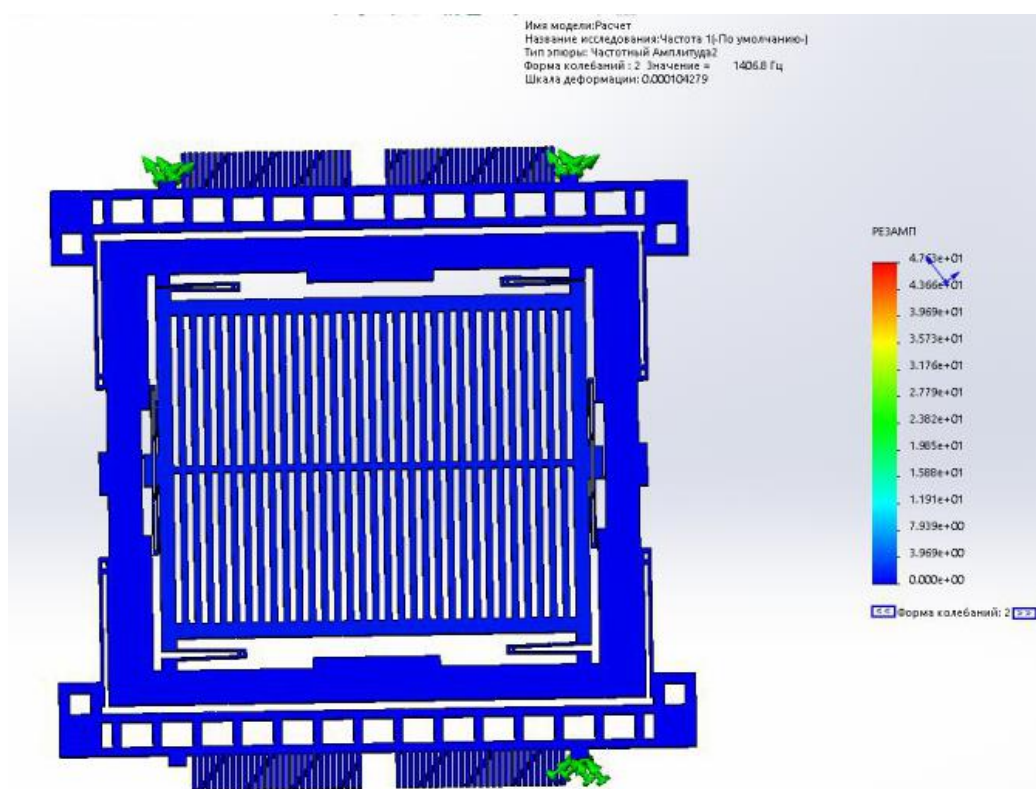


Рис. 2.27. Епюра деформаций пружних елементів ММГ по осі Y.

Результати представлені на рис. 2.24 – 2.27 ілюструють «штатний» режим роботи ММГ. Амплітуди коливань рамок і інерційних мас не перевищують допустимі межі.

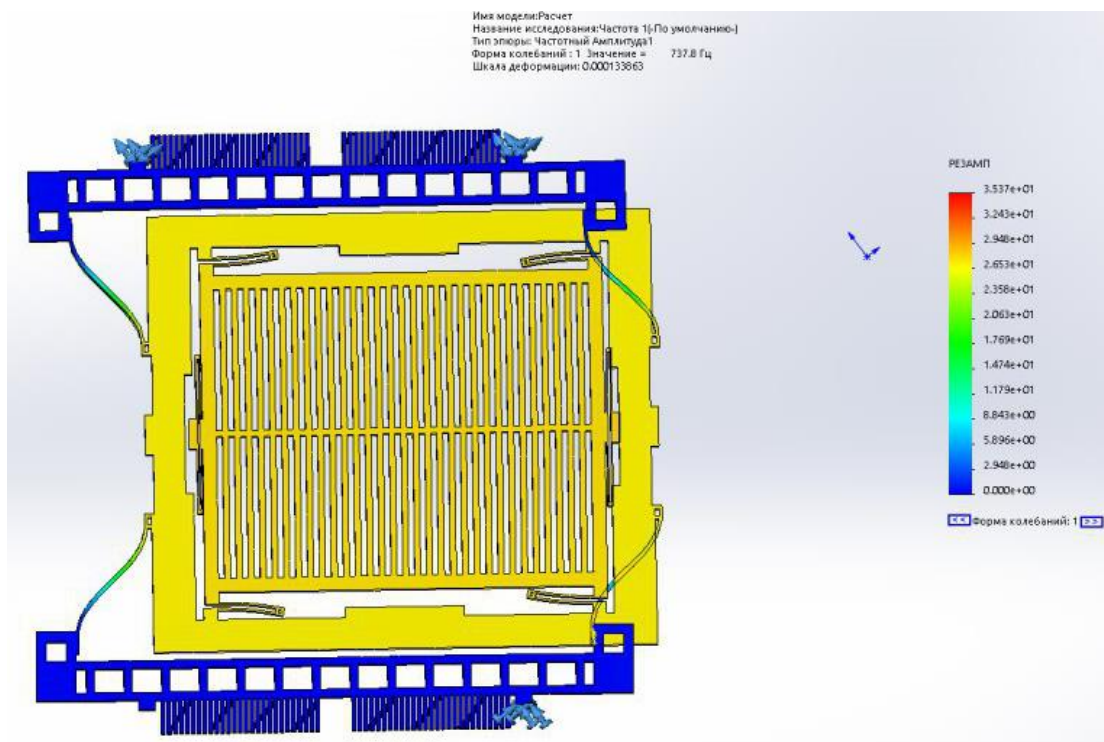


Рис. 2.28. Епюра деформацій пружних елементів ММГ по осі X.

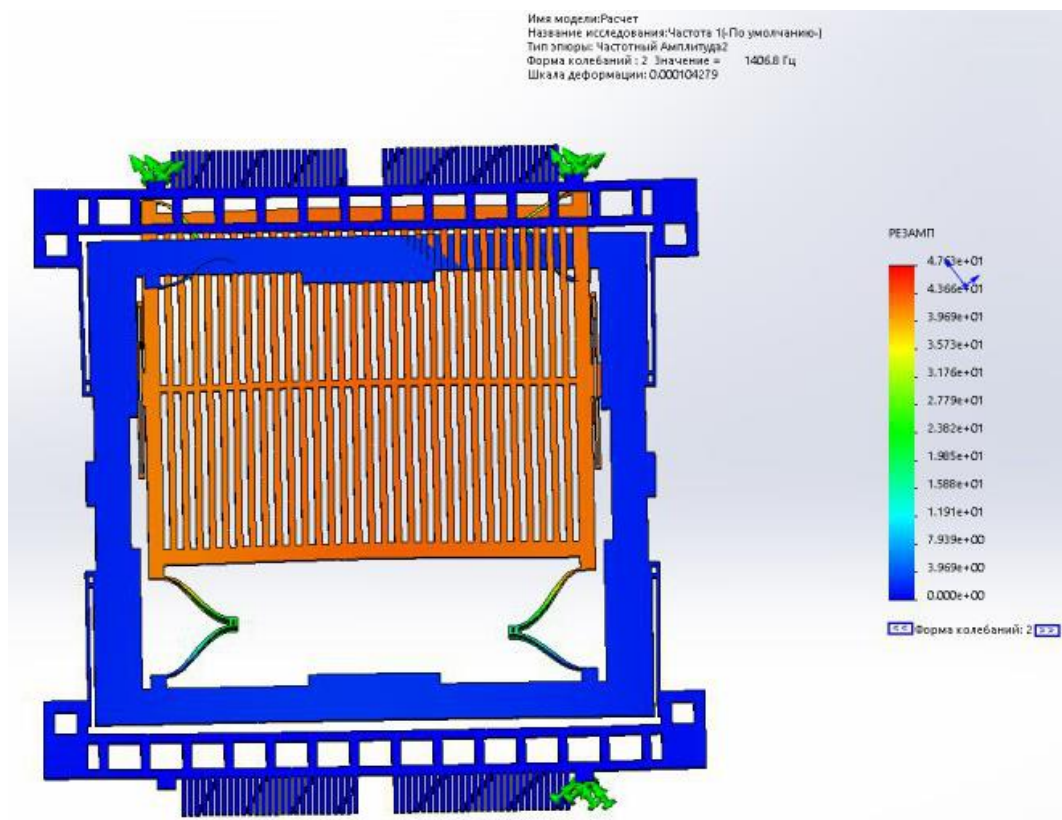


Рис. 2.29. Епюра деформацій пружних елементів ММГ по осі Y.

Важливо провести дослідження і при граничних умовах роботи датчика. Для цього було обрано режим роботи, що перевищує допустимі межі.

Результати представлені на рис. 2.28 – 2.29 ілюструють поведінку ММГ при надвисокому частотному руху основи. За результатами видно, що навіть якщо пружні елементи підвісу витримують навантаження, то відбувається руйнування блоку чутливого елементу.

Проведені дослідження дозволяють визначити граничні допустимі режими роботи розробленого ММГ.

2.9. Програмна модель

Побудуємо програмну модель двомасового мікромеханічного гіроскопа L-L типу за математичною моделлю (2.17) у середовищі MATLAB і SIMULINK. Схема моделі програми показано нижче на рис. 2.30.

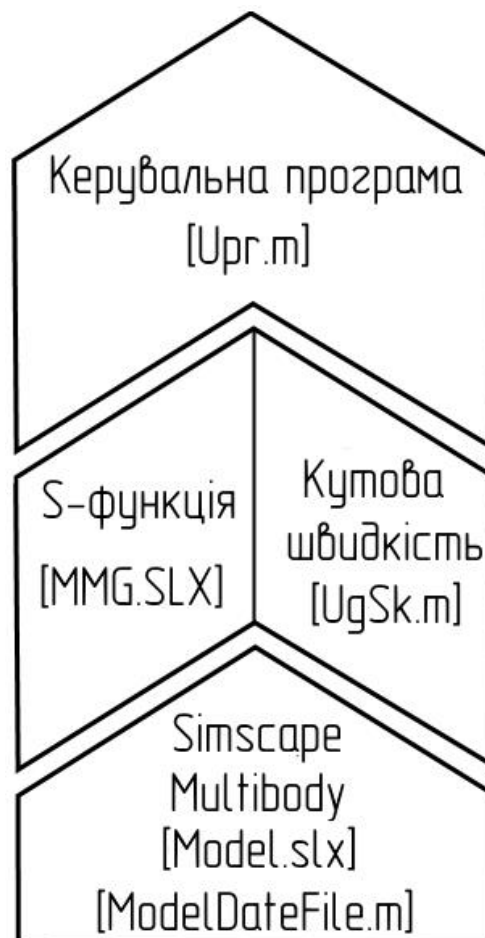


Рис. 2.30. Схема програмної моделі двохмасового ММГ

Найбільш важливою є контрольна програма **Upr.m**. Він встановлює параметри чутливого елемента і руху бази. Спочатку параметри гіроскопа вводяться як коефіцієнт демпфірування, маса і жорсткість підвіски. Параметри руху підстави: постійна складова, частота коливань і амплітуда. Він реалізує процес інтегрування диференціальних рівнянь, взаємозв'язок окремих функцій і виведення результатів у вигляді графіків.

Текст керувальної програми (Upr.m):

```
clc
clear all
global h1 h2 k1 k2 lam q1 q2
lam=18000*2*pi; %Частота і ампл. перв. колив.
m1=14e-4; m2=28e-4; %Маса інерційної маси, та рамки відповідно
f1=0.4; f2=0.4; %Коефіцієнт демпфування
h1=f1/m1; h2=f1/m1;
c1=2.4e3; c2=2.3e3; %Коефіцієнт пружності
q1=1e-5/m1; q2=0e-5/m2;
k1=(lam)^2; k2=1.02*(lam)^2;
%Швидкість
Uxm=0*pi/180; Uym=0*pi/180; Uzm=0*pi/180; %Амплітуда
w=500*2*pi; %Частота
Ux0=0*pi/180; Uy0=10*pi/180; Uz0=0*pi/180; %Постійна
%Прискорення
NmX=0e-4; NmZ=0e-4;%Амплітуда гармонічного прискорення
NcX=6e-4; NcZ=6e-4; %Постійне прискорення
Z0=-NcZ/k2
%% Інтегрування
Tk=0.01; y0=[0 0 0 0];
run('model_DataFile.m')
sim('ММГ_Solo.slx')
t=tout;
X1=yout(:,1); Z1=yout(:,3);
%% Графіки
figure
subplot(2,1,1)
plot(t,X1,'LineWidth',4),grid
set(gca, 'FontSize',14)
ylabel('X, м')
title('Первинні коливання')
subplot(2,1,2)
plot(t,Z1,'LineWidth',4),grid
set(gca, 'FontSize',14)
ylabel('Z, м')
xlabel('Час, с.')
title('Вторинні коливання')
%% 2-х масовий
X2=yout(:,5); Z2=yout(:,7);
X_s=X1-X2; Z_s_Minus=Z1-Z2; Z_s_Plus=Z1+Z2;
```



```

Z_Usk=(max(Z_s_Plus)-min(Z_s_Plus))/2
figure
subplot(2,1,1)
plot(t,Z1,'LineWidth',4),grid
set(gca, 'FontSize',14)
ylabel('X, м')
title('Первинні коливання')
subplot(2,1,2)
plot(t,Z_s_Minus,t, Z_s_Plus,'LineWidth',4),grid
set(gca, 'FontSize',14)
ylabel('Z, м')
xlabel('Час, с.')
title('Вторинні коливання')
legend('Z1-Z2', 'Z1+Z2')

```

Чисельне інтегрування рівняння (2.3) виконується в середовищі Matlab Simulink з використанням S-функції **ММГ_S.m**. За допомогою цієї стандартної процедури ви можете об'єднати інтерфейс Simulink з можливістю сформулювати правильну програму у вигляді коду в Matlab. Оскільки використовується схема ММГ з двома масами, необхідно створити дві S-функції, а в другій амплітуда первинних коливань буде мати протилежний знак. Надаємо текст **ММГ_S.m** нижче.

```

function [sys,x0,str,ts,simStateCompliance] = ММГ_S(t,x,u,flag,lam,y0)
global h1 h2 k1 k2 q1 q2
switch flag,
    case 0,
        [sys,x0,str,ts,simStateCompliance]=mdlInitializeSizes(y0);
    case 1,
        sys=mdlDerivatives(t,x,u,lam);
    case 2,
        sys=mdlUpdate(t,x,u);
    case 3,
        sys=mdlOutputs(t,x,u);
    case 4,
        sys=mdlGetTimeOfNextVarHit(t,x,u);
    case 9,
        sys=mdlTerminate(t,x,u);
    otherwise
        DASTudio.error('Simulink:blocks:unhandledFlag', num2str(flag));
End
function [sys,x0,str,ts,simStateCompliance]=mdlInitializeSizes(y0)
sizes = simsizes;
sizes.NumContStates = 4;
sizes.NumDiscStates = 0;
sizes.NumOutputs = 4;
sizes.NumInputs = 5;
sizes.DirFeedthrough = 1;

```

```

sizes.NumSampleTimes = 1;
sys = simsizes(sizes);
x0 = y0;
str = [];
ts = [0 0];
simStateCompliance = 'UnknownSimState';
function sys=mdlDerivatives(t,x,u,lam)
global h1 h2 k1 k2 Gm q1 q2
Q1=q1*sin(lam*t);
Q2=q2*sin(lam*t);
Uxc=u(1);
Uyc=u(2);
Uzc=u(3);
Wx=u(4);
Wz=u(5);
sys(1)=x(2);
sys(2)=Q1-2*Uyc*x(4)-2*h1*x(2)-k1*x(1)-Wx;
sys(3)=x(4);
sys(4)=Q2+2*Uyc*x(2)-2*h2*x(4)-k2*x(3)-Wz;
function sys=mdlUpdate(t,x,u)
sys = [];
function sys=mdlOutputs(t,x,u)
sys = x;
function sys=mdlGetTimeOfNextVarHit(t,x,u)
sampleTime = 1;
sys = t + sampleTime;
function sys=mdlTerminate(t,x,u)
sys = [];

```

Рух підстави задається трьома проекціями кутової швидкості U_x, U_y, U_z та прискорення за законами:

$$U_x = U_{xc} + U_{xm} \sin(\omega t), U_y = U_{yc} + U_{ym} \sin(\omega t) \text{ та } U_z = U_{zc} + U_{zm} \sin(\omega t).$$

$$W_x = W_{xc} + W_{xm} \sin(\omega t) \text{ та } W_z = W_{zc} + W_{zm} \sin(\omega t)$$

Блоки SineWave були використані для формування базового руху, як показано на нижче рис. 2.31.

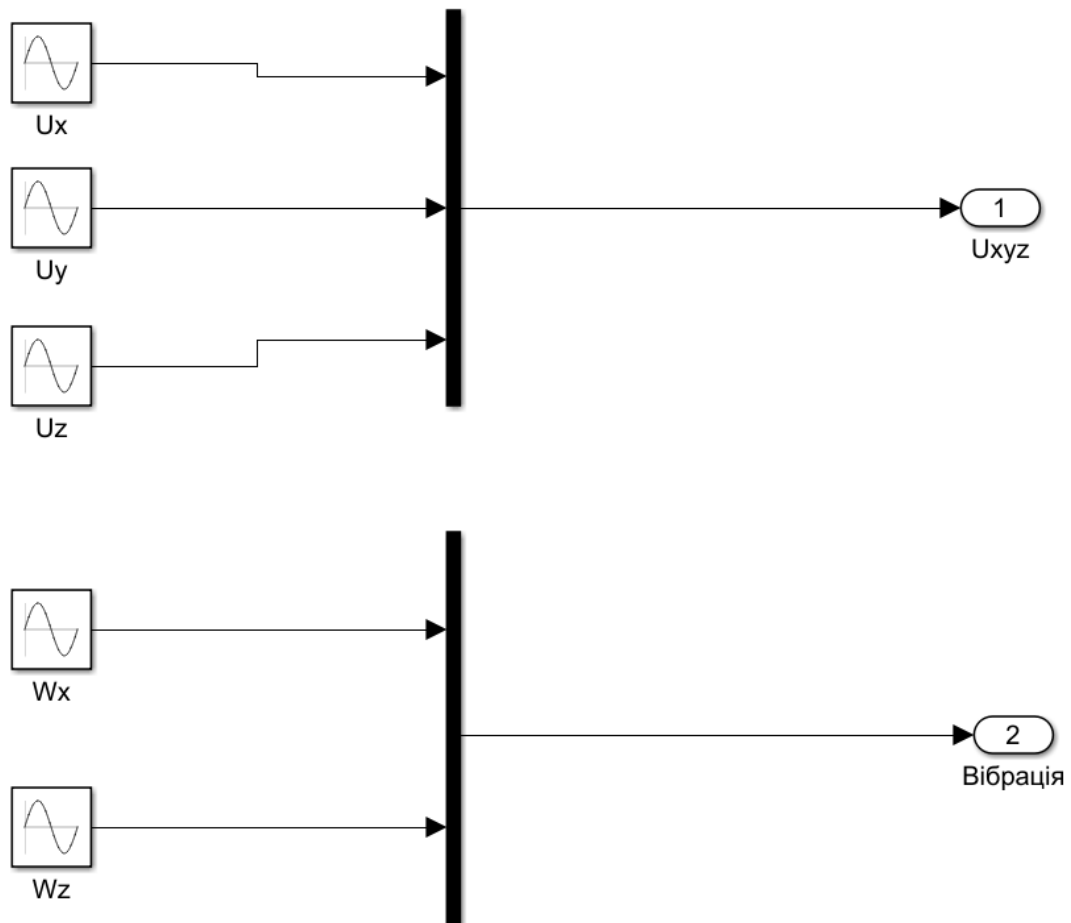


Рисунок 2.31. Блок руху основи

Проекції кутової швидкості обчислюються функцією **UgSk.m** і імпортуються в Simulink з використанням інтерпретованого функціонального блоку MATLAB. Текст процедури **UgSk.m** наведено нижче.

```
function U=UgSk(u)
global Fiz Rz Wz V
% Вхідні величини
% u(1) = psi
% u(2) = theta
% u(3) = fi
% u(4) = psit
% u(5) = thetat
% u(6) = fit
% Вихідні величини
% U(1) = Uksi
% U(2) = Ueta
% U(3) = Uzeta
% U(4) = Uxc

% U(5) = Uyc
% U(6) = Uzc
```

```

cP=cos(u(1)); sP=sin(u(1));
cT=cos(u(2)); sT=sin(u(2));
cF=cos(u(3)); sF=sin(u(3));
Uzeta=Wz*cos(Fiz)+V*sP/Rz;
Ueta=Wz*cos(Fiz)+V*sP*tan(Fiz)/Rz;
Uksi=V*cP/Rz;
c11=cP*cT;
c12=sP*sF-cP*cF*sT;
c13=sP*cF+cP*sF*sT;
c21=sT;
c22=cT*cF;
c23=-cT*sF;
c31=-cT*sP;
c32=cP*sF+sP*cF*sT;
c33=cP*cF-sP*sF*sT;
Uxc=u(5)*cF+Uzeta*c11+Ueta*c21+(Uksi+u(4))*c31;
Uyc=u(6)+Uzeta*c21+Ueta*c22+(Uksi+u(4))*c32;
Uzc=u(5)*sF+Uzeta*c13+Ueta*c23+(Uksi+u(4))*c33;

U=[Uzeta Ueta Uksi Uxc Uyc Uzc];

```

2.10. Імпорт моделі використовуючи Simscape Multibody

Імпортуємо модель гіроскопа, створену в SolidWorks 3D, в середу MatLab - Simulink, використовуючи плагін Simscape Multibody Link. Результат зображений на рис. 2.32.

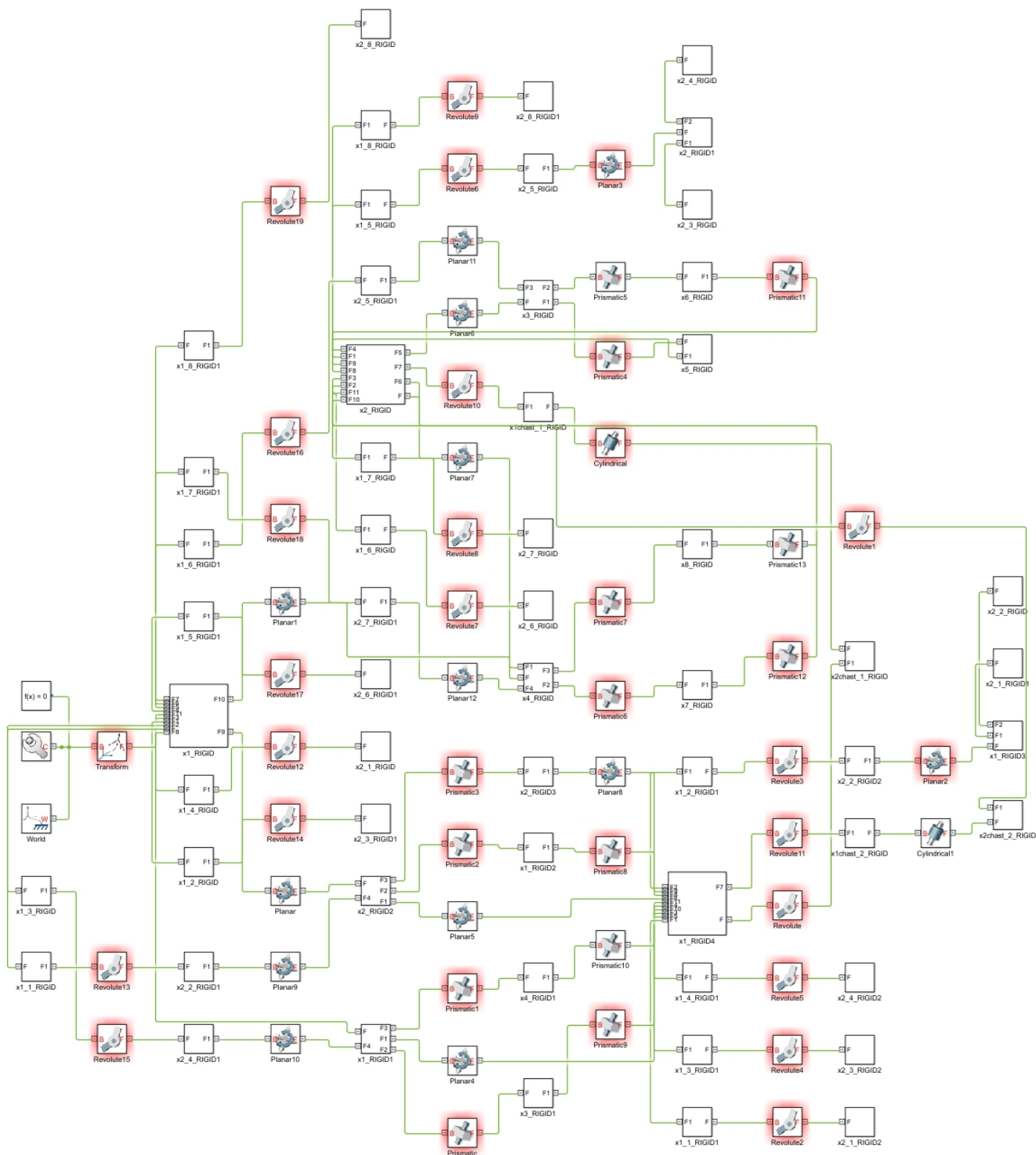


Рисунок 2.33. Модель двомасового ММГ у Simscape Multibody

За допомогою плагіна портується збірка з середовища SolidWorks у XML файли. У середовищі Matlab за допомогою функції **smimport** ('назва збірки.xml') імпортується модель ММГ. У нашому випадку модель складається з п'яти підборок, це робиться для того щоб правильно імпортувати модель у Simscape та

задати наші прив'язки без помилок. Для того щоб спростити модель можна використовувати підсистеми (Subsystem) в яку переміщаємо окремі елементи тривимірної моделі.

В результаті отримуємо програмну модель двомасового ММГ L-L типу, що поєднує в собі можливість інтегрування диференціальних рівнянь руху у Matlab–Simulink та спостереження за рухом ЧЕ внаслідок заданого руху. Simulink схема програмної моделі представлена на рис.2.34.

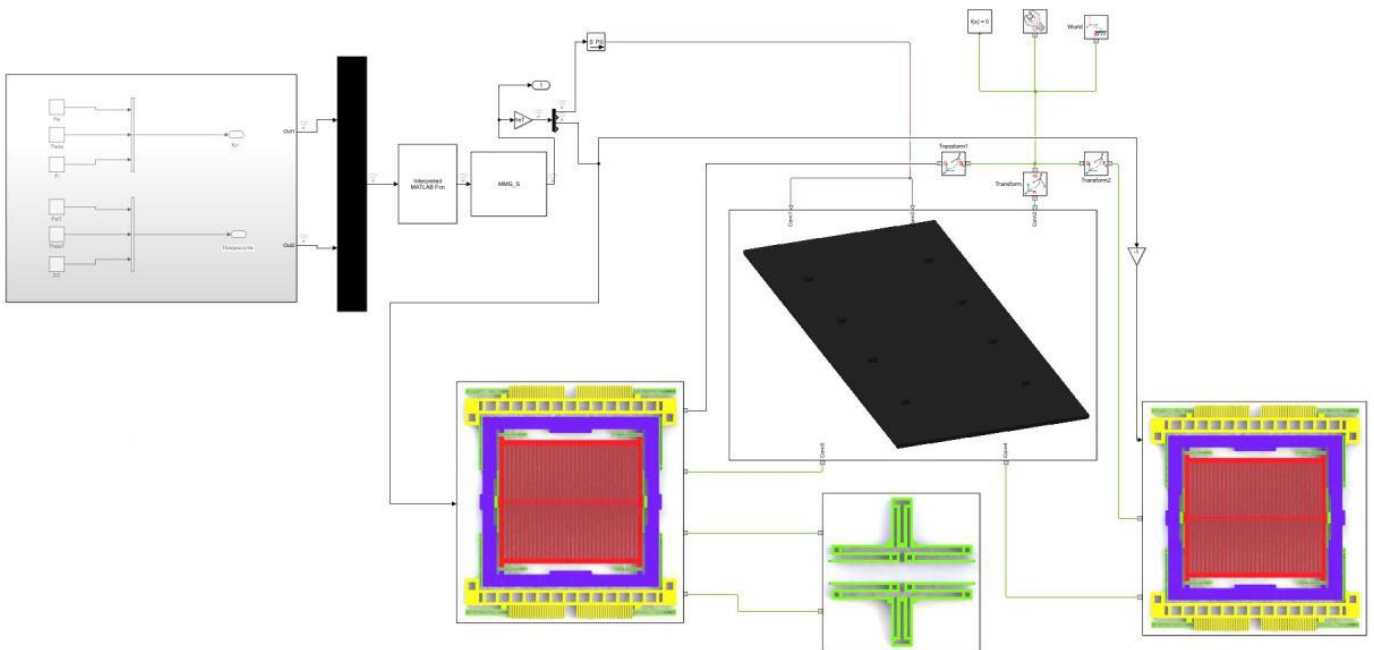


Рис.2.34. Програмна модель ММГ у Simulink

РОЗДІЛ 3

3. МОДЕЛЮВАННЯ

3.1. Програмне моделювання

Створена програмна модель, що дозволяє виконувати різні набори експериментів. Як перевірки моделі адекватності ми проведемо серію досліджень по одномасовій ММГ. Для цього ми розглянемо сигнал тільки на першій S-функції.

Для моделювання однієї маси ММГ була проведена серія експериментів з різними основними рухами:

- постійна кутова швидкість (рис.3.1)
- постійне прискорення (рис. 3.3)
- гармонійне прискорення (рис.3.5)

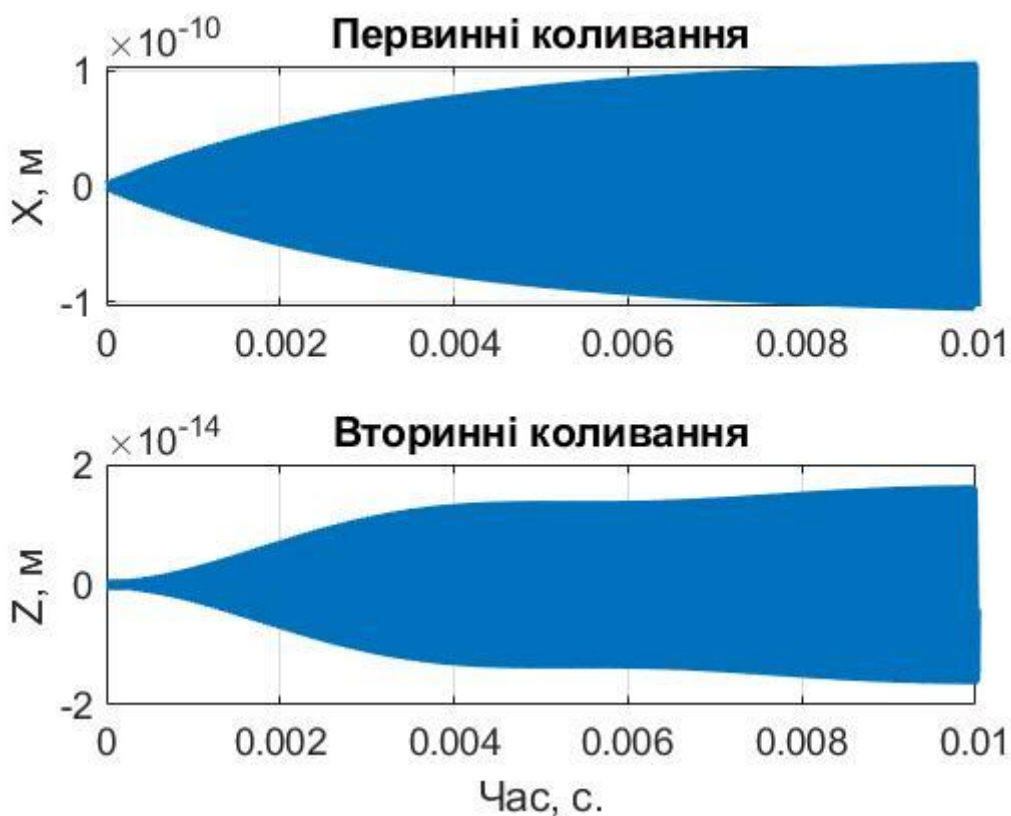


Рис.3.1. Первинні і вторинні коливання одномасового ММГ.

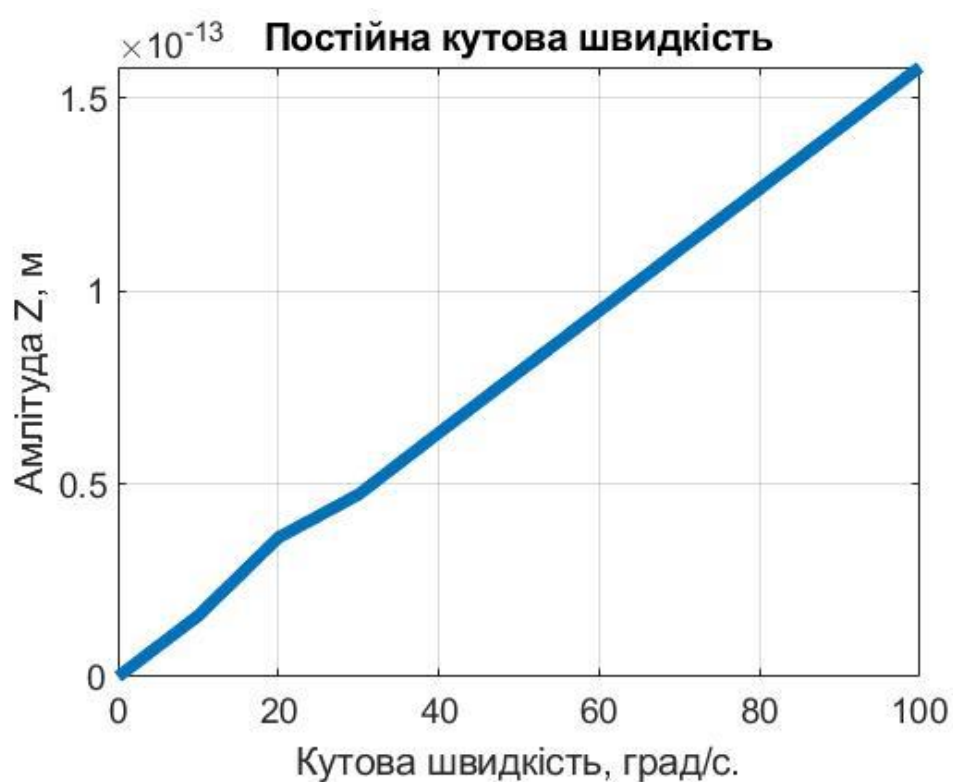


Рис.3.2. Залежності амплітуди вторинних коливань від кутової швидкості.

З рис. 3.2 видно, що амплітуда вторинних коливань ЧЕ збільшується зі збільшенням кутової швидкості основи.

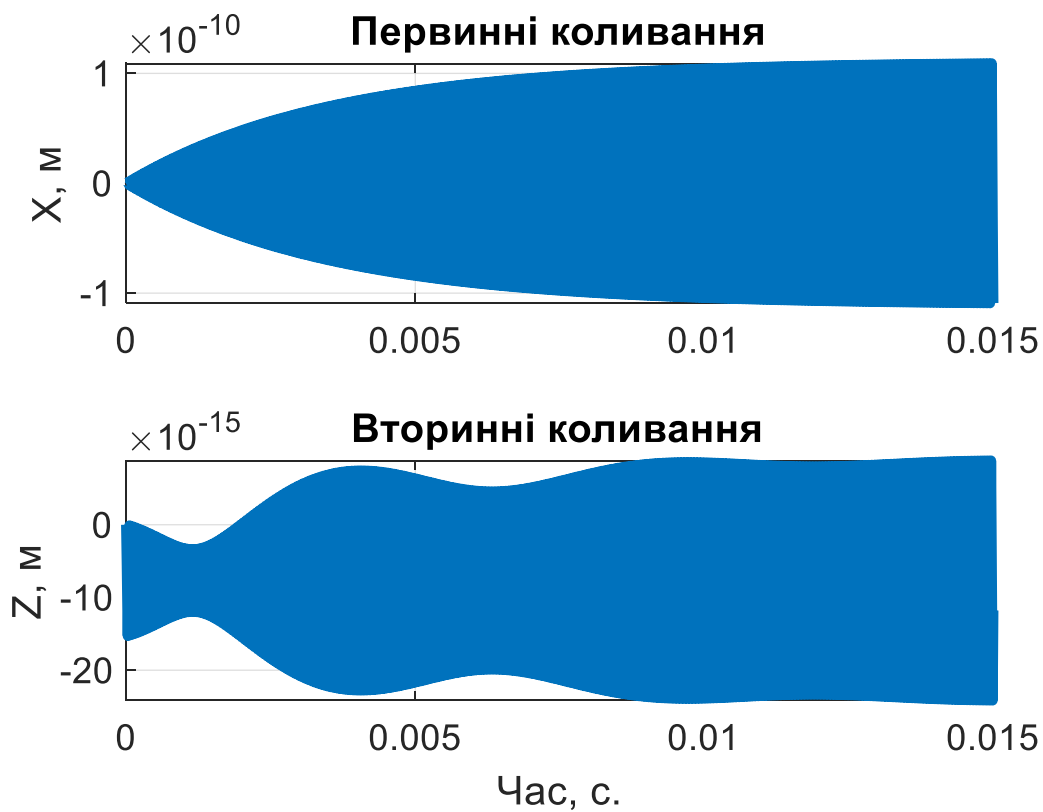


Рис.3.3. ММГ при постійному прискоренні.

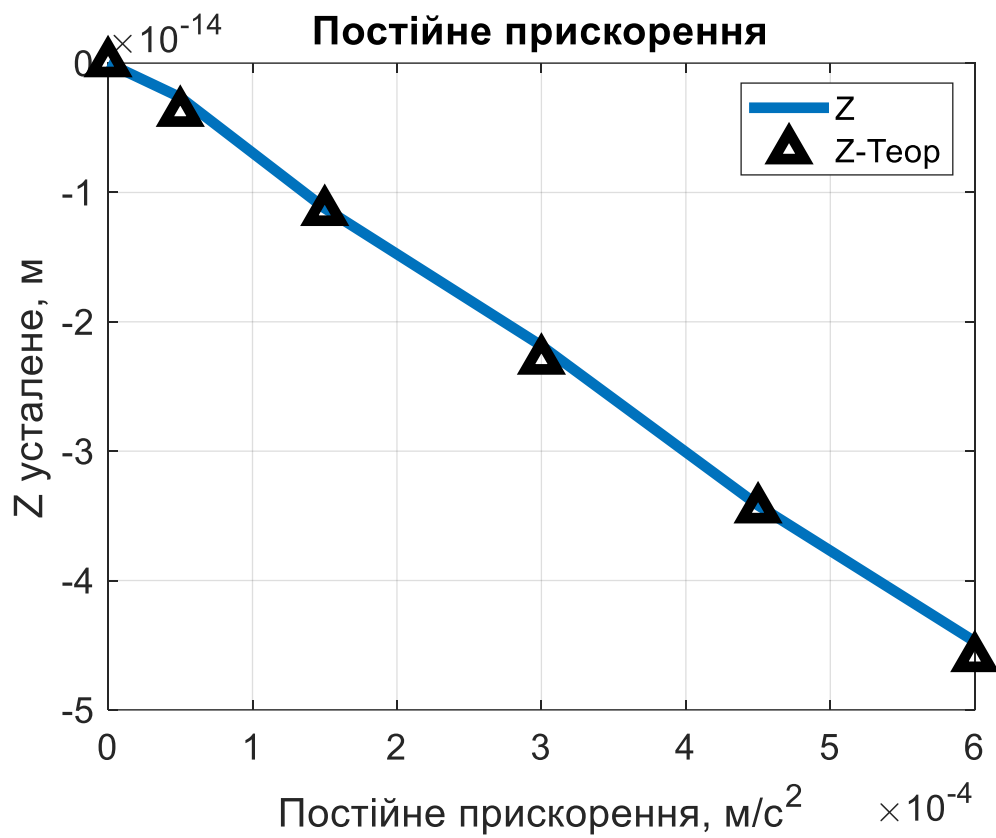


Рис.3.4. Зміщення коливань при постійному прискоренні

З рис.3.4 видно, що встановлене значення коливань ЧЕ гіроскопа зміщується відносно початкового на величину $Z_T = \frac{W_z}{k_2^2}$. Результати моделювання співпадають з аналітично розрахованими.

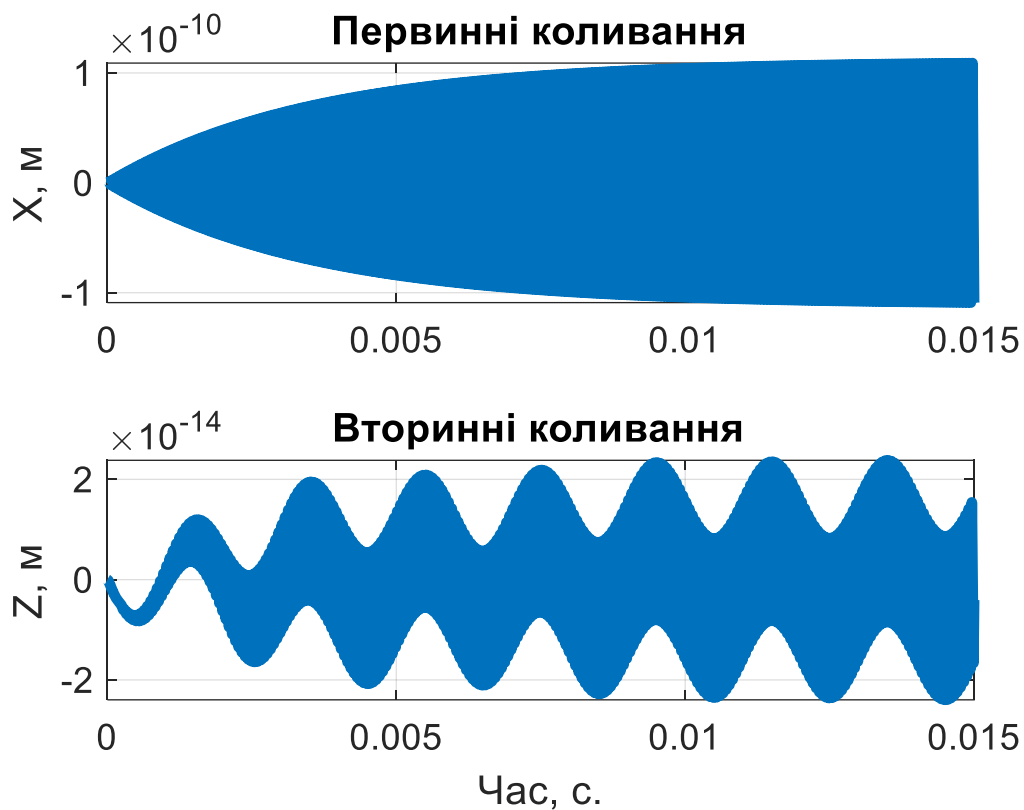


Рис.3.5. ММГ при гармонічному прискоренні.

Моделювання двомасових ММГ проводили аналогічним чином. Результати представлені на рис. 3.6 – 3.12. Сигнал від ММГ видається відповідно до [6] за двома законами: $Z_1 - Z_2$ і $Z_1 + Z_2$. Перший закон пропорційний кутовий швидкості обертання підстави, а другий - прискоренню. Результати моделювання, представлені на малюнку 3.7, показують дворазове збільшення амплітуди вторинних коливань в порівнянні з одиночною масою ММГ. Однак при використанні такої гармонійної схеми прискорення (рис. 3.8) видно, що вторинні коливання відповідно до закону $Z_1 - Z_2$ позбавлені впливу прискорення. На малюнку 3.9 показано, що використання закону $Z_1 + Z_2$ дозволяє побудувати акселерометр на основі ММГ з двома масами, оскільки амплітуда вторинних коливань пропорційна цьому.

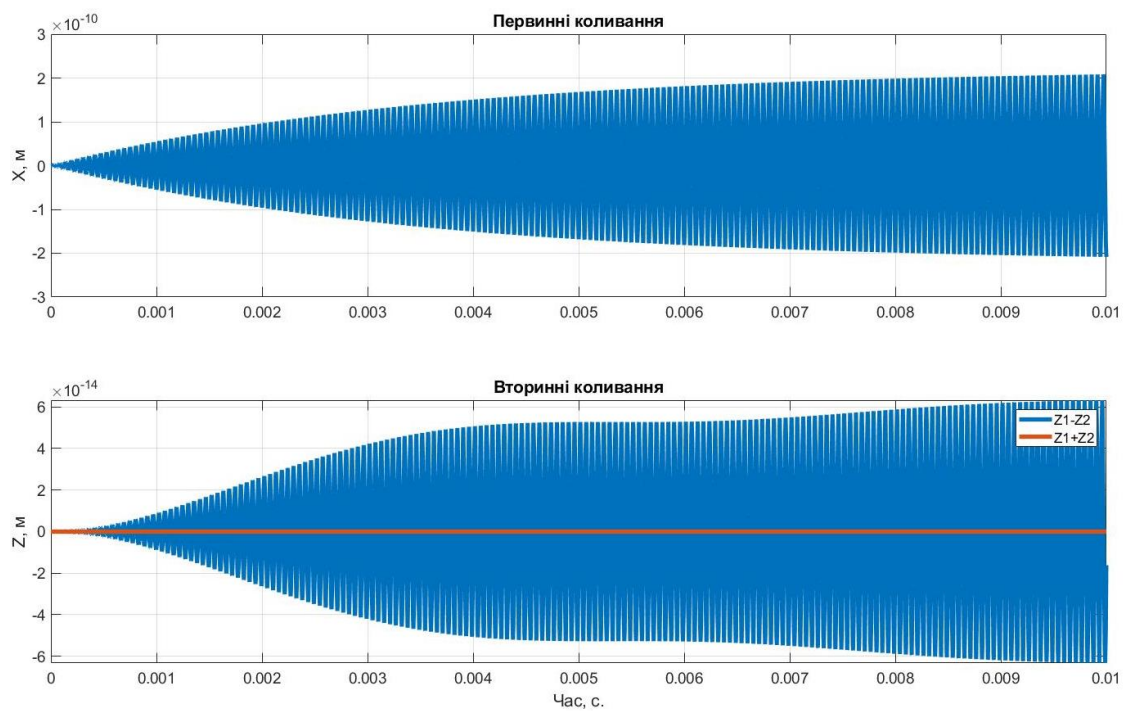


Рис.3.6. Первинні і вторинні коливання двомасового ММГ

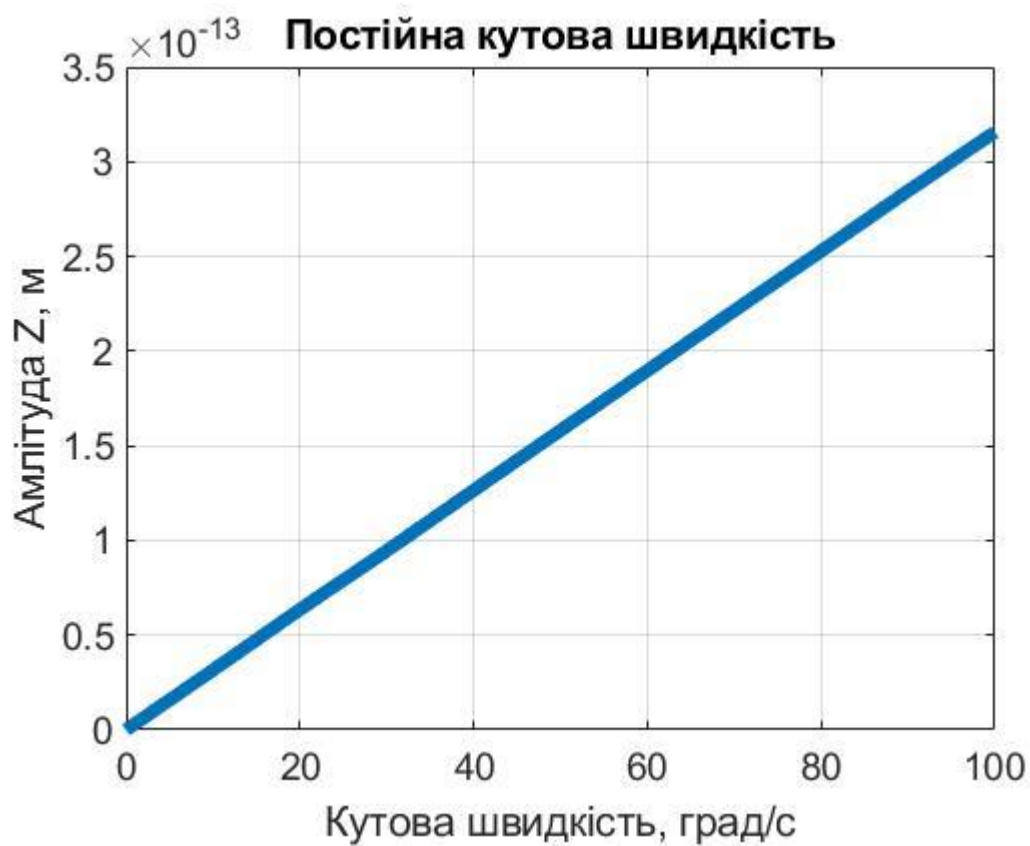


Рис.3.7. Амплітуда вторинних коливань при постійній кутовій швидкості.

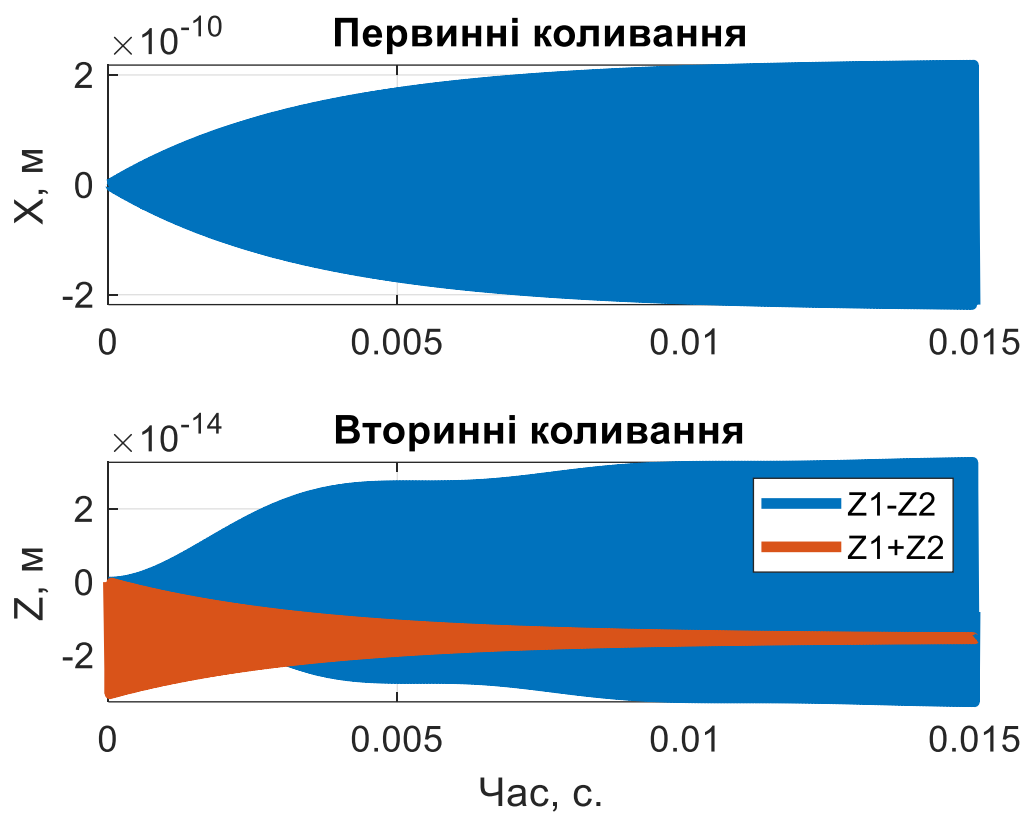


Рис.3.8. ММГ при постійному прискоренні.

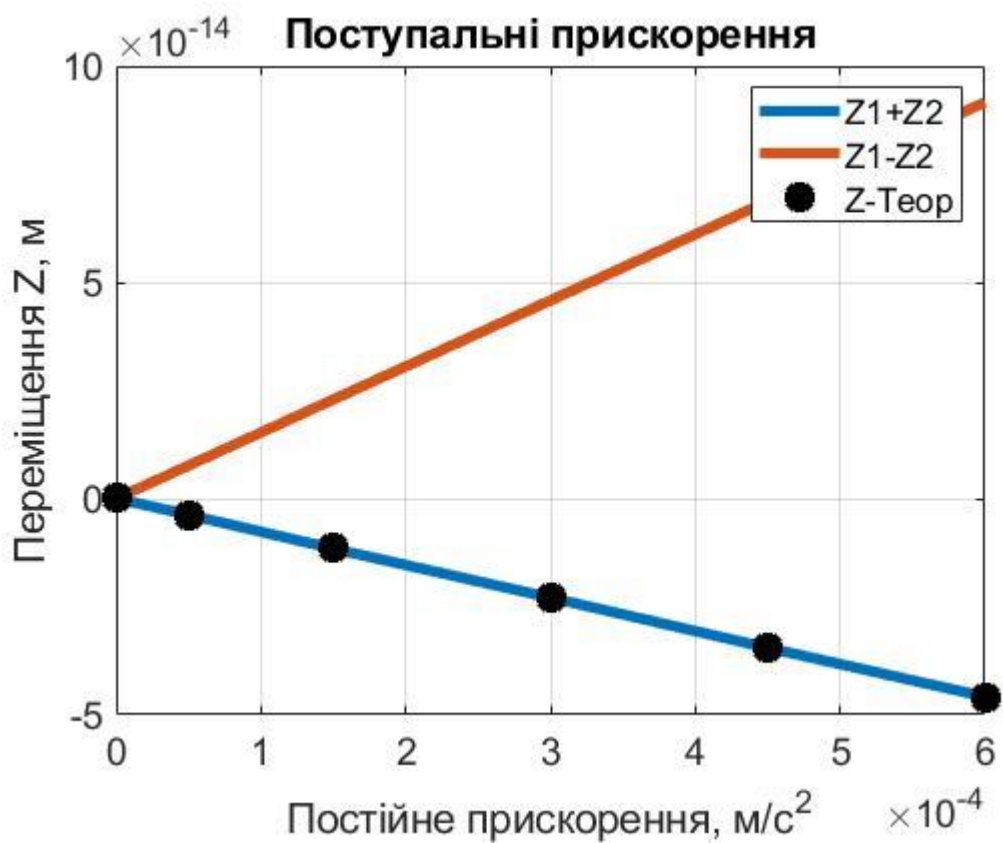


Рис.3.9. Зміщення коливань ЧЕ при постійному прискоренні

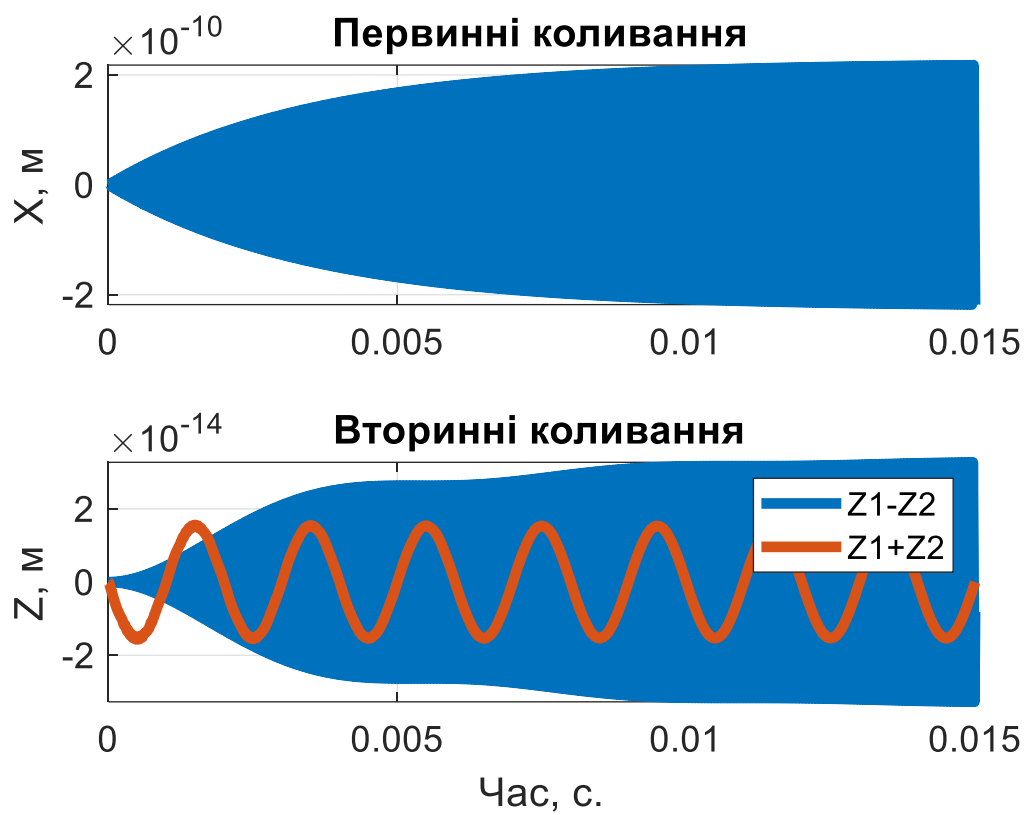


Рис.3.10. ММГ при гармонічному прискоренні.

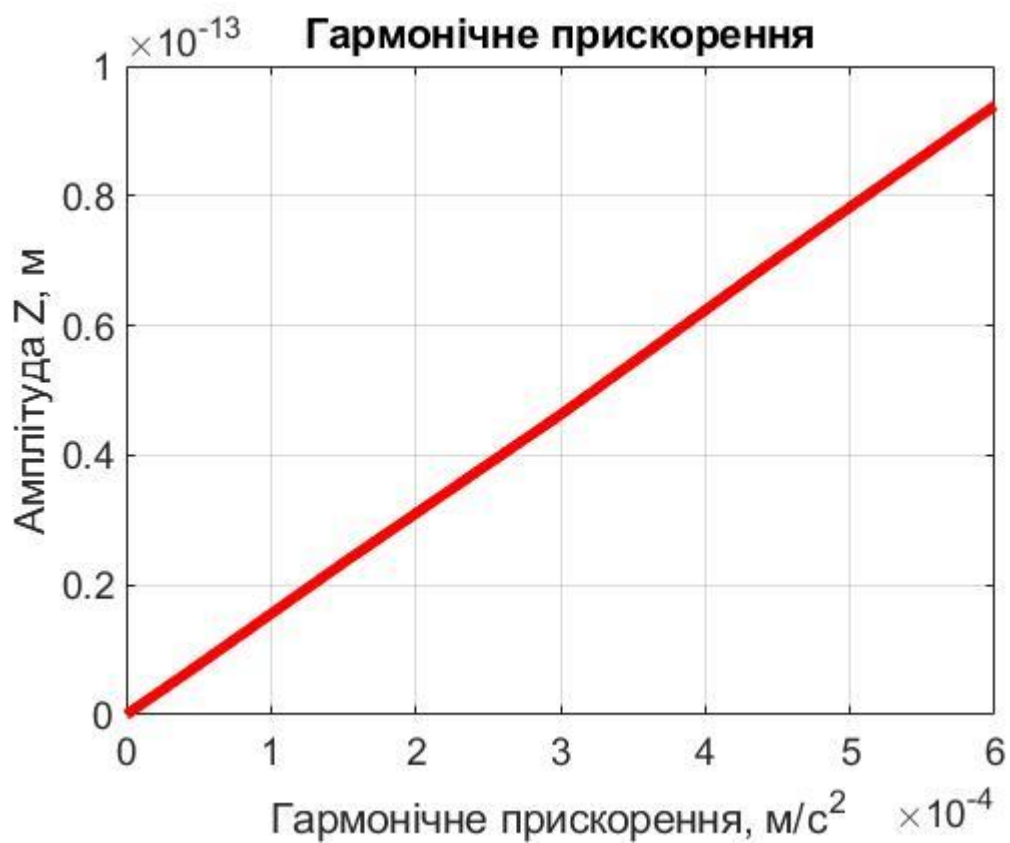


Рис.3.11. Амплітуда коливачь « $Z1+Z2$ » при гармонічному прискоренні.

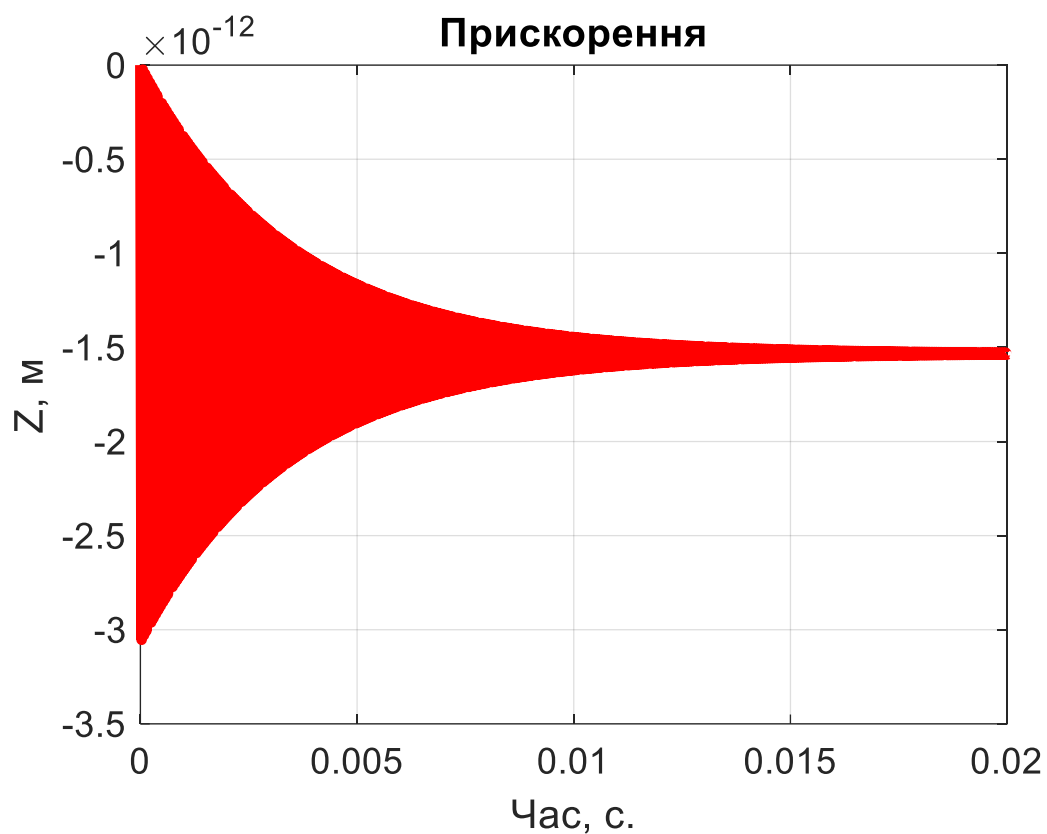


Рис.3.12. Вторинні коливання ММГ при прискоренні основи».

З рис.3.12 видно, що вторинні коливання ММГ при прискоренні основи, коливання ЧЕ гіроскопа зміщується відносно початкового на величину $Z_T = \frac{W_z}{k_2^2}$.
Результати моделювання співпадають з теоретичними розрахунками рис (2.9).

РОЗДІЛ 4

4. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ “Система вимірювань прискорень на основі мікромеханічного датчика”

4.1. Опис ідеї проекту (товару, послуги, технології)

4.1.1. Зміст ідеї полягає у розробці та впровадженні додаткової рамки ММГ для покращення точності роботи, та виміру прискорень. Проаналізовано можливі напрямки застосування, а також основні вигоди, що може отримати потенційний користувач товару за різними напрямками застосування (табл. 4.1)

Таблиця 4.1. Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Можливість проведення імітаційного моделювання інженерних розрахунків у різних сферах діяльності	Військова промисловість	Покращення стабілізації обладнання, яке встановлюється на військову техніку
	Авіація	Покращення стабілізації обладнання на борту авіаційної техніки
	Морська справа	Внаслідок хвиль, морський транспорт піддається хитами, внаслідок чого обладнання, встановлене на ньому, потребує точної стабілізації
	Автомобільна промисловість	Покращення систем навігації і динамічного контролю безпеки
	Навігаційне обладнання	Покращення навігаційних систем для стабілізації супутникових антен, керування безпілотними літальними апаратами
	Робототехніка	Покращення систем навігації для мобільних роботів

	Медицина	Покращення стабілізації мікроінструментів, діагностичної апаратури
	Побутова електроніка	Покращення стабілізації зображень у фото- та відеокамерах, пристроях для віртуальних комп'ютерних ігор тощо.

Висновки: Як видно з таблиці 4.1, існує досить багато сфер, де актуальне використання запропонованої ідеї. Потенційних споживачів можна знайти у цивільних сферах, таких як авіація, морська справа, побутова електроніка, робототехніка, медицина, автомобільна промисловість та інших сферах, де використовується навігаційне обладнання, а також у військовій сфері. З таблиці також видно, що для потенційних користувачів існує багато вигод.

4.1.2. Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї, основні відмінності від аналогів, які вже існують, а також товарів-замінників (табл. 4.2). Порівняння із пропозиціями конкурентів передбачає:

- визначення техніко-економічних властивостей та характеристик ідеї;
- визначення попередніх конкурентів;
- порівняльний аналіз показників: для власної ідеї визначаються показники,

що мають:

- а) гірші значення (W, слабкі);
- б) аналогічні (N, нейтральні) значення;
- в) кращі значення (S, сильні).

Таблиця 4.2. Визначення сильних, слабких характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко - економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів	W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
-------	--	---	--------------------	------------------------	--------------------

		Мій проект	Всі виробники ММГ			
1	Вартість програмного забезпечення	500 ум.од.	2500 - 4000 ум.од.			Найменша оптимальна вартість
2	Маса	0.01-4 кг	0.01 - 4 кг			Маса приладу залишається незмінною, оскільки розробка є додатком до програмного забезпечення
3	Гарантійний термін	До 4 років без калібрування	До 2 років без калібрування			Найвищий
4	Швидкодія	0.1 с	0.5-1с			Найкраща
5	Точність показників (наявність похибок)	Найвища/похибки відсутні	Висока/зведені до мінімуму			Найкращі показники та найвища точність

Висновки: Було визначено, що потенційними конкурентами проекту можуть виступати всі виробники ММГ. Проведено порівняння основних технікоекономічних характеристик. При цьому, як видно з таблиці 4.2, проект має виключні переваги з усіх показників, оскільки і був створений з метою покращення будь-якого приладу, який створюють конкуренти. Тобто, можна зробити також висновок, що всі потенційні конкуренти одночасно виступають і потенційними клієнтами, що спрощує вихід продукту на ринок.

4.2. Технологічний аудит ідеї проекту

Проведено аудит технології за допомогою якою можна реалізувати ідею проекту (табл. 4.3). Це передбачає аналіз наступних складових:

- Технологію за якою буде виготовлено товар;
- Існування таких технологій;
- Доступність цих технологій.

Таблиця 4.3. Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Отримання патенту	Офіційні права на розробку ідеї, підтвердження авторства	Наявна	Доступна
2	Підвищення точності системи	Вдосконалення алгоритму роботи системи	Потрібно вдосконалити наявну розробку	Доступна
3	Спрощення реалізації алгоритмів на практиці	Вдосконалення програмного коду, розробка спеціальних інструкцій	Розробити	Доступна
4	Замір прискорення	Додання додаткової інерційної маси	Розробити	Доступна
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Підвищення точності, та вимір прискорення за допомогою ММГ				

Висновки: За таблицею 4.3 обрано наступну технологію реалізації проекту – підвищення точності системи, це є найбільш привабливим для користувачів, тому що систему легко буде підлаштовувати під різноманітні вхідні параметри і використовувати для різноманітного обладнання. Цю технологію потрібно розробити, що підвищує унікальність. Всі описані технології реалізації є доступними.

4.3. Аналіз ринкових можливостей

4.3.1 Визначено ринкові можливості, які можна використати під час впровадження проекту (табл. 4.4), ринкові загрози, які можуть негативно вплинути на реалізацію проекту. Це дозволяє правильно спланувати напрямки розвитку проекту з урахуванням стану ринкового середовища.

Таблиця 4.4. Поперелня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	7
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	5000000 ум.од.
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Якщо розглядати військову, авіа- та суднобудівну сферу, медицину, то це сертифікація
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Існують (якщо розглядати військову, авіа- та суднобудовну сферу, медицину)
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	48%

Висновки: Ринок є дуже привабливим для входження в зв'язку з гарною рентабельністю і загальним обсягом продаж. Існують певні обмеження, які стосуються просування товару на ринок військової та медичної, де потрібно виконання специфічних умов на стандартизації та сертифікацію. Кількість основних гравців на ринку дорівнює 7, що є досить оптимальною конкуренцією.

4.3.2 Визначено потенційні групи клієнтів, їх основні характеристики, на основі цього формується основний список вимог до товару (табл. 4.5).

Таблиця 4.5. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
-------	--------------------------	--	---	-----------------------------

1	Підвищення точності показників приладів (додання додаткової інерційної маси ММГ)	Військові, розробка авіаційної і морської техніки, автомобільна промисловість, розробка навігаційного обладнання та побутової електроніки, робототехніка, медицина	<ul style="list-style-type: none"> - Для військової та медичної сфери особливості пов'язані з стандартизацією і сертифікацією. - Для авіаційної і морської техніки важливішою є точність. - Для автомобільної промисловості, розробки навігаційного обладнання та побутової електроніки, робототехніки, важливішим є простота впровадження 	<ul style="list-style-type: none"> - Точність показників - Швидкодія алгоритму - Надійність - Адаптивність - Простота та легкість у використанні.
---	--	--	---	--

Висновки: Визначено основні цільові аудиторії (військові, розробка авіаційної і морської техніки, автомобільна промисловість, розробка навігаційного обладнання та побутової електроніки, робототехніка, медицина) та їх головні особливості, а також відмінності між вимогами до точності показників системи у різних груп аудиторії. Також визначено основні вимоги споживачів до товару, які полягають у точності компенсації, швидкодії алгоритму, надійності, адаптивності, простоті та легкості у використанні.

4.3.3 Аналіз ринкового середовища. Складаються таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають (табл. № 4.6-4.7). Фактори в таблиці подані в порядку зменшення значущості.

Таблиця 4.6. Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Зріст конкуренції	Вихід на ринок нових конкурентів, які будуть пропонувати більш дешевий або більш точний аналог за такою ж вартістю	Втрата клієнтів.

2	Зменшення попиту	Оскільки товар не орієнтований на широкий загал, він може швидко перенасичити ринок	Пошук нових клієнтів або можливостей адаптації алгоритмів під інші сфери.
3	Вартість процедури впровадження алгоритмів до програмного забезпечення приладів	Подорожчання процедури впровадження алгоритмів до програмного забезпечення приладів, що призведе до подорожчання самого приладу	Відмова від товару внаслідок подорожчання
4	Зміни у сертифікації	Змінення стандартів сертифікації	Втрата клієнтів, для яких потрібен сертифікований товар
5	Точність	Погана точність продукту, товар не надійний	Відмова від товару

Висновки: У таблиці 4.6 описані основні види загроз, з яких головною загрозою обрано зріст конкуренції, що може призвести до відмови клієнтів від товару внаслідок появи більш дешевих або більш точних аналогів, які зможуть запропонувати потенційному користувачу кращі або близькі характеристики. Інші загрози також є дуже важливими і потрібно їх враховувати, оскільки наслідками може бути знову ж таки відмова користувачів від товару.

Таблиця 4.7. Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Зростання попиту	Можуть з'явитись нові потенційні покупці, або компанії-конкуренти вийдуть з ринку	Зростання прибутку, можливість подальшого розвитку та вдосконалення
2	Необхідність модифікацій та вдосконалення	Розширення можливостей системи за потребою користувачів	Вдосконалення та розширення можливостей системи за бажанням потенційних або постійних клієнтів
3	Розробка нових допоміжних алгоритмів в якості додатків	Розширення можливостей системи	Розширення можливостей системи, збільшення появи нових клієнтів, можливість освоювати нові галузі
4	Нові потенційні групи клієнтів	Поява нових потенційних груп покупців	Аналіз потреб нової групи покупців
5	Здешевлення вартості процедури впровадження	Вдосконалення та спрощення процедури,	Зменшення ціни на готову систему

Висновки: У таблиці 4.7 описані основні види можливостей, з яких найголовнішими обрано збільшення попиту, що призведе до зростання прибутку, можливості подальшого розвитку та вдосконалення, і, як наслідок цього, можливі будуть будь-які інші можливості, що описані у таблиці. Інші фактори відкривають потенціал для вдосконалення та розширення можливостей алгоритму, а також до зменшення ціни на вже готову систему.

4.3.4 Аналіз пропозиції: визначаються загальні риси конкуренції на ринку (табл.4.8).

Таблиця 4.8. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Тип конкуренції - чиста	На ринку існує не багато фірм які пропонують послуги даного типу	- Можливість швидко проводити вдосконалення, випереджаючи конкурентів - Можливість прогнозування змін на ринку
2. За рівнем конкурентної боротьби - міжнародний	Потенційні клієнти є у всьому світі	Вихід на міжнародний ринок
3. За галузевою ознакою - міжгалузева	Товар може використовуватись у різноманітних галузях	Розширювати спектр надання послуг
4. Конкуренція за видами товарів: товарно-видова	Конкуренція присутня між товарами одного виду.	Підвищення якості, точності вимірювання та зменшення похибки пристрою.
5. За характером конкурентних переваг: - цінова	Варіювання ціни внаслідок вибору користувачем функціональних особливостей	Підприємство може працювати над покращенням методу обробки тим самим дозволяючи не збільшувати ціну на продукт

Висновки: Проаналізовано основні риси конкуренції на ринку, їх вплив на діяльність підприємства, а також можливі дії компанії, щоб бути завжди конкурентоспроможною. Визначено, що конкуренція у галузі є невеликою (практично відсутньою), і вона існує між товарами одного виду, є можливості

виходу на міжнародний ринок, використання товару можливе у різноманітних сферах, а довіра до товару будується на репутації бренду.

4.3.5 Після проведення аналізу конкуренції проводиться аналіз умов конкуренції в галузі (за моделлю М. Портера) (табл. 4.9).

Таблиця 4.9. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	Відсутні	Поки що відсутні	Всі виробники ММГ	Військові, розробка авіаційної і морської техніки, автомобільна промисловість, розробка навігаційного обладнання та побутової електроніки, робототехніка, медицина	Всі наявні на ринку гіроскопи
Висновки:	Конкуренція у галузі поки що практично відсутня	Можливості виходу на ринок є, і вони не важкі. Можуть з'явитись потенційні конкуренти	Постачальники не диктують умови ринку	Клієнти практично не диктують умов, окрім військової промисловості та медицини, де існує обов'язкова сертифікація	Обмежень немає, тому що товарзамінник не є настільки точним, як запропоновані алгоритми.

4.3.6 На основі аналізу конкуренції, проведеного наведеного в табл. 4.9, а також із урахуванням характеристик ідеї проекту, що наведені в табл. 4.2, вимог споживачів до товару (табл. 4.5.) та факторів маркетингового середовища (табл. 4.6, 4.7) визначимо та обґрунтуємо перелік факторів конкурентоспроможності. Аналіз оформлено в табл. 4.10.

Таблиця 4.10. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Точність	Алгоритми компенсації дрейфів ММГ, що забезпечують необхідну точність систем
2	Адаптивність	Можливість використання системи при різноманітних умовах
3	Швидкодія	Висока швидкодія системи, як наслідок – якість вихідного корисного ефекту
4	Надійність	Система працює стабільно при різноманітних зовнішніх чинниках
5	Сертифікованість	Відповідність необхідним стандартам, для отримання сертифікатів за потребою потенційних клієнтів

Висновки: Визначено основні фактори конкурентоспроможності, які полягають у точності, адаптивності, швидкодії, надійності і сертифікованості, а також наведено обґрунтування, яке показує сильні сторони проекту і те, як ці сильні сторони можуть бути корисними потенційному клієнту при використанні товару в порівнянні з товарами-конкурентами.

4.3.7 За визначеними факторами конкурентоспроможності (табл. 4.10) проводиться аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту (табл. 4.11).

Таблиця 4.11. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з виробниками ММГ						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Наявність патентів	20					+		
2	Точність	20							+
3	Надійність	19		+					
4	Технічна підтримка	19					+		
5	Сертифікованість	19					+		

Висновки: У порівнянні з товаром-конкурентом були визначені наступні сильні сторони, які полягають у наявності патентів, точності. Більш слабкі сторони полягають у сертифікованості і надійності, оскільки неможливо передбачити

абсолютно всі впливи. Загалом товар є повністю конкурентоспроможним з існуючих.

4.3.8 Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (табл. 4.12).

Таблиця 4.12. SWOT- аналіз стартап-проекту

<p>Сильні сторони:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Найвища точність серед всіх існуючих аналогів 2. Наявність всіх патентів 3. Відповідність необхідним стандартам, для проходження сертифікації 4. Можливість застосування у військовій сфері та медицині 	<p>Слабкі сторони:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Оскільки продукт новий, його надійність до кінця не перевірена 1. Неможливість забезпечити всіх користувачів повною технічною підтримкою на початкових етапах
<p>Можливості:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Збільшення продажу; 2. Отримання державних замовлень на отримання послуг; 2. 3. Вдосконалення системи Вихід на міжнародний ринок 	<p>Загрози:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Цінова конкуренція в зв'язку з появою нових гравців на ринку. 3. Втрата потенційних клієнтів через недостатню технічну підтримку.

Висновки: Проведено SWOT-аналіз, за яким були визначені можливі загрози і можливості, які передбачаються сильними та слабкими сторонами проекту. Загрози є, але вони більш пов'язані з тим, що продукт досить новий, і максимальна технічна підтримка нових користувачів не є головною метою, оскільки вся увага приділяється в першу чергу точності, адаптивності до різних факторів і легкості у використанні запропонованими алгоритмами.

4.3.9 За SWOT-аналізом розроблено альтернативи ринкової поведінки для виведення стартап-проекту на ринок. І визначено оптимальний термін реалізації. (табл. 4.13).

Таблиця 4.13. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Стратегія нейтралізації ринкових загроз сильними сторонами стартапу	Висока	12 місяців

2	Стратегія компенсації слабких сторін стартапу наявними ринковими можливостями	Висока	18 місяців
3	Стратегія виходу з ринку	Низька	6 місяців

Висновки: Після проведеного аналізу було обрано альтернативу – стратегію нейтралізації ринкових загроз сильними сторонами стартапу. Це пов'язано з високою ймовірністю отримання ресурсів, а також досить стислих строків на реалізацію. Інші альтернативи значно програють по ймовірності отримання ресурсів, а виграш по часу, якщо розглядати таку альтернативу як стратегія виходу з ринку не корелює з ймовірністю отримання ресурсів.

4.4. Розроблення проекту ринкової стратегії

4.4.1 Визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (табл. 4.14).

Таблиця 4.14. Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Військова промисловість	Одразу не готові, треба певний час на перевірку	Високий	Не інтенсивна	Важко
2	Авіаційне будівництво	Готові, якщо буде сертифікація	Високий	Не інтенсивна	Середньо
3	Суднобудівництво	Готові, якщо буде сертифікація	Високий	Не інтенсивна	Середньо
4	Автомобільна промисловість	Готові	Високий	Не інтенсивна	Просто
5	Робототехніка	Готові	Високий	Не інтенсивна	Просто
6	Медицина	Одразу не готові, треба певний час на перевірку	Високий	Не інтенсивна	Важко
7	Розробка навігаційного обладнання та побутової електроніки	Готові	Високий	Не інтенсивна	Просто

Під час аналізу потенційних груп споживачів було прийнято рішення, що компанія буде працювати із автомобільною промисловістю, компаніями, що займаються розробкою навігаційного обладнання та побутової електроніки, робототехніки, із суднобудівною та авіаційною промисловістю..

4.4.2 Формування базової стратегії розвитку (табл. 4.15).

Таблиця 4.15. Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
1	Стратегія нейтралізації ринкових загроз сильними сторонами стартапу	Стратегія диференційованого маркетингу	- Використання нових досягнень - Задоволення вимог користувачів - Постійне вдосконалення.	Стратегія диференціації

Висновки: Як базову стратегію розвитку було обрано стратегію диференціації, яка передбачає надання товару важливих з точки зору споживача відмінних властивостей, які роблять товар особливим в порівнянні з товарами-конкурентами за певними характеристиками, іноді зважаючи на не досить важливі характеристики товару. Так буде більше уваги приділятися високій точності, адаптивності та спрощенню у використанні, але менше технічній підтримці (оскільки цей фактор буде не суттєвим при виконанні трьох попередньо зазначених).

4.4.3 Вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 4.16).

Таблиця 4.16. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
1	Проект є «першопрохідцем» на ринку	Так, будуть вестися пошуки нових споживачів, аналізуватися нові групи потенційних клієнтів, а також переманюватися у конкурентів, за допомогою пропонування кращого продукту.	Не буде проводитись копіювання, а навпаки буде впроваджено покращення і вдосконалення потрібних характеристик	Стратегія виклику лідера

Висновки: За стратегію конкурентної поведінки було обрано стратегію виклику лідера, яка полягає у протистоянні лідеру, завдяки створенню конкурентоспроможного товару, який у загальній кількості характеристик може зайняти найвищу позицію на ринку, і стати одним із найпривабливіших для клієнтів. Також проект є перщопрохідцем на ринку. Основні характеристики товару конкурента не будуть копіюватись, а навпаки вдосконалюватись.

4.4.4 На основі вимог споживачів до постачальника та до продукту, в залежності від обраних стратегій конкурентної поведінки та базової стратегії розвитку розробляється стратегія позиціонування (табл. 4.17).

Таблиця 4.17 - Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1	Точність системи	Стратегія диференціації	Найвища точність.	Високоточна, стабільна.
2	Адаптивність до різноманітних умов	Стратегія диференціації	Універсальність	Адаптивна до будь-яких обставин, універсальна
3	Надійність впродовж часу роботи	Стратегія диференціації	Якість	Надійна
4	Простота у використанні	Стратегія диференціації	Простота	Проста, легка, зрозуміла.
5	Вдосконалення продукту враховуючи побажання споживачів	Стратегія диференціації	Формування лояльності і прихильності споживачів, підтримка вхідних бар'єрів.	Якість. Ціна Зворотній зв'язок із виробником. Технічна підтримка.

Висновки: Сформульовано позицію власного проекту, це три ключові поняття: високоточна, надійна і проста у використанні система. Такий висновок зроблено на основі аналізу головних вимог цільової аудиторії до розроблюваного товару, якими було обрано точність системи, простоту у використанні, адаптивність, а також надійність системи впродовж часу роботи і вдосконалення продукту враховуючи побажання споживачів. Базовою стратегією було обрано стратегію диференціації.

4.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

4.5.1 Формування маркетингової концепції товару, яку отримає споживач (табл. 4.18).

Таблиця 4.18. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Необхідність впровадження 2 інерційної маси ММГ з метою отримання прискорення та максимально точних даних	Алгоритм має найвищі показники точності серед всіх можливих аналогів. Він також є адаптивним до різноманітних факторів, простим у використанні.	Максимальна точність, адаптивність, надійність, проста у використанні, підтримка споживача, можливість широкого використання.

Висновки: Як видно з табл. 4.18, для потенційного споживача існує досить багато переваг, які полягають у максимальній точності, адаптивності, надійності, прості у використанні, підтримці споживача, можливості широкого використання відносно товарів конкурентів. Деякі характеристики і можливості товари-конкуренти взагалі не можуть запропонувати у такій якості потенційному користувачеві.

4.5.2 Трирівнева маркетингова модель товару: (табл. 4.19).

Таблиця 4.19 Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Продукт дає можливість компенсувати дрейфи ММГ і отримати максимально точні дані на виході. Ці алгоритми дуже легко впроваджувати в системне забезпечення самих гіроскопів у вигляді спеціального коду, що робить їх простими і зрозумілими у використанні.		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх/Тл/Е/Ор
	1. Точність компенсації 2. Швидкість роботи алгоритмів 3. Надійність впродовж часу роботи 4. Простота у використанні	1. 0.03°/с 2. Залежить від роботи мікропроцесора 3. – 4. Нм	1. Тх 2. Тх 3. Тх 4. Тл
	Якість: відповідає нормам ISO.		

	Пакування: програмне забезпечення
	Марка: проект «Система вимірювань прискорень на основі мікромеханічного датчика»
III. Товар із підкріпленням	До продажу: отримання спеціальної консультації щодо встановлення програмного забезпечення та його використання
	Після продажу: Гарантійне обслуговування, сервісна підтримка.
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: Завдяки патентуванню винаходу.	

Висновки: Зроблено опис трьох рівнів моделі товару, за яким легко зрозуміти призначення товару та які проблемні задачі він вирішує, основні властивості та технічні характеристики які може запропонувати даний товар, основні сертифікації товару, а також яка підтримка може очікувати цільового користувача до та після покупки. Захист товару від копіювання буде зроблено завдяки патентуванню.

4.5.3 Визначення цінових меж для встановлення ціни на потенційний товар (табл. 4.20).

Таблиця 4.20 - Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	1000-200 ум.од.	500 – 4000 ум.од.	10000-15000 ум.од.	Нижня межа: 2500 ум.од. Верхня межа: 3500 ум.од

Висновки: Встановлено межі ціни на товар, які дорівнюють від 2500 до 3500 ум.од. Ціна є оптимальною для запропонованих користувачу характеристик, і знаходиться на рівні товарів-конкурентів. Ціна базувалась на собівартості розробки програмного забезпечення, а також враховано унікальність даних алгоритмів. Визначено рівень доходів цільової групи споживачів, але треба зазначити, що ці системи не на широку аудиторію, тобто їх основними споживачами є великі компанії.

4.5.4 Визначення оптимальної системи збуту (табл. 4.21).

Таблиця 4.21 - Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
-------	---	---	----------------------	--------------------------

1	Роздрібна закупівля	Супровід товару на всьому етапі доставки до кінцевого споживача	Канал одного рівня	Підприємства роздрібної торгівлі
2	Оптова закупівля	Супровід товару на всьому етапі доставки до кінцевого споживача, з додатковими умовами і бонусами.	Дворівневий канал	Підприємства оптової торгівлі
3	Орендування	Консультація щодо використання обладнання	Канал нульового рівня	Підприємства від виробника

Висновки: Встановлено глибини каналу збуту та оптимальні системи збуту за специфікою закупівельної поведінки цільових клієнтів. Основні це роздрібна закупівля, оптова закупівля та орендування. Визначено функції збуту, які повинен виконувати постачальник товару. Визначено, через що оптимально реалізовувати збут при різних специфіках закупівельної поведінки цільових клієнтів.

4.4.5 Розроблення концепції маркетингових комунікацій (табл. 4.22).

Таблиця 4.22. Концепція маркетингових комунікацій

№ п / п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Знайти можливість швидко та зручно розробити двохмасову модель ММГ для отримання більш точних вихідних даних та прискорень.	Інтернет, телефон, відвідування наукових форумів, презентацій	Точність, прискорення, швидкість, адаптивність.	Приваблення нових цільових клієнтів	Розповісти про новий вид ММГ та отримання з їх допомогою даних про прискорення, більш точних даних вдосконалення роботи всіх гіроскопів

Висновки: Розроблено концепцію маркетингової комунікації, яка буде полягати у привабленні нових цільових клієнтів, за допомогою інтернету, телефону та проведенні спеціальних наукових форумів і презентацій, які обрані основними каналами комунікацій, шляхом розміщення рекламного звернення, де буде

розповідатись про новий підхід до компенсації дрейфів мікромеханічних гіроскопів та отримання з їх допомогою більш точних даних.

4.6. Висновки до розділу 4

При розробці стартап-проекту було пророблено всі етапи, необхідні для правильного аналізу ринку, потенційних клієнтів, конкурентоспроможності, факторів ризику та можливостей, вибору правильних стратегій для впровадження стартап-проекту на ринок, для того, щоб він став успішним.

Визначено основні напрямки застосування та вигоду для користувачів, а також сильні та слабкі сторони проекту у порівнянні з товарами-конкурентами. На основі цього було виявлено, що на товар існує досить великий попит у різноманітних сферах, таких, як авіабудування, морська справа, військова промисловість, автомобільна промисловість, розробка навігаційного обладнання, робототехніка, медицина.

Товар має досить гарні показники у порівнянні з товарами-конкурентами. Проведено технологічний аудит проекту для вибору правильної технології реалізації ідеї проекту. Було обрано технологію - підвищення точності системи, що є більш привабливим для користувачів, тому що отримані показники будуть максимально точними. Визначено головні потреби споживачів та заходи їх реалізації. Також була проведена оцінка сильних та слабких сторін проекту та розрахована собівартість виробу та можливий прибуток. Також виконано порівняльний аналіз конкурентів.

Проведено аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту, за яким було виявлено, що ринок є дуже привабливим для входу, а середній рівень рентабельності у галузі є високим. Визначено основні цільові аудиторії клієнтів, а також головні відмінності між ними. Основним ризиком загроз обрано зріст конкуренції, внаслідок чого може початися втрата клієнтів. А основною можливістю є зростання попиту, що призведе до збільшення виробництва. Проаналізовано основні риси конкуренції на ринку і визначено, що конкуренція у галузі є

невеликою, є можливості виходу на міжнародний ринок, а використання товару можливе у різноманітних сферах.

За результатами аналізу за моделлю М. Портера, визначено, що з оглядом на конкурентну ситуацію, на ринку можна працювати. Конкуренції у галузі практично не існує, проте в майбутньому можуть з'явитись потенційні конкуренти. Постачальники не диктують умов на ринку. Є специфічні умови з боку деяких потенційних клієнтів.

Товари-замінники не зможуть задовольнити потреби користувачів. Визначено фактори конкурентоспроможності за якими проведено аналіз сильних та слабких сторін проекту: наявність патентів, висока точність. Більш слабкі сторони полягають у сертифікованості і надійності, оскільки неможливо передбачити абсолютно всі впливи. Загалом товар є повністю конкурентоспроможним з існуючих. Після проведеного SWOT – аналізу було обрано альтернативу ринкової поведінки – стратегію нейтралізації ринкових загроз сильними сторонами стартапу. Розроблено ринкову стратегію проекту. Як цільові групи обрано: автомобільну промисловість, компанії, що займаються розробкою навігаційного обладнання, робототехніки, авіаційне будівництво, суднобудівництво. Як базову стратегію розвитку було обрано стратегію диференціації. Обрано стратегію конкурентної поведінки – стратегія лідера. Сформульовано позицію власного проекту, це три ключові поняття: високоточний, надійний і простий у використанні алгоритм. Розроблено маркетингову програму стартап-проекту, за якою встановлено, що для потенційного користувача товару є багато переваг, які не можуть запропонувати конкуренти.

Встановлено межі ціни на товар, які дорівнюють від 2500 до 3500 ум.од. Ціна є оптимальною і знаходиться на рівні товарів-конкурентів. Встановлено глибини каналу збуту та оптимальні системи збуту і розроблено концепцію маркетингової комунікації, яка буде полягати у привабленні нових цільових клієнтів.

Із зазначеного вище зроблено висновки, що подальша імплементація проекту є цілком доцільна.

ВИСНОВОК

В роботі вивчався двомасовий мікромеханічний гіроскоп типу L-L. Проаналізовано типи мікромеханічних гіроскопів, їх основні характеристики і розробка стартап проекту.

Була складена математична модель гіроскопа, розроблена модель чутливого елемента в SolidWorks і розраховані найбільш важливі параметри. У програмній моделі, побудованої в середовищі MatLab Simulink, тривимірна модель ММГ була імпортована з використанням пакета Simscape Multibody. Це дало змогу дослідити гіроскоп і одночасно спостерігати рух його тривимірної моделі в реальному часі.

При програмному моделюванні була проаналізована адекватність моделі, і було досліджено рух чутливого елемента гіроскопа з різними рухами підстави. В цілому моделювання показало зближення результатів з описаними в літературі. Встановлено, що використання двомасової схеми дозволяє повністю компенсувати вплив гармонічного прискорення на рух інерційних мас ММГ. Більш того, використання таких диференціальних схем побудови ММГ дозволяє використовувати його в якості датчика прискорення.

Результати досліджень були випробувані на науково-практичних конференціях «Погляд у майбутнє приладобудування 2018 року» та «Інтегровані інтелектуальні роботи технічні системи», «Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні ЕІРП-2019», «Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп'ютерних технологій 2019».

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Распопов В.Я. Микромеханические приборы: учебное пособие. – М.: Машиностроение, 2007.- 400с.:ил.
2. Лазарев Ю. Ф., Бондар П. М. Основи теорії чутливих елементів систем орієнтації. Підручник. – К.: , 2009. – 626 с
3. Елисеев Д.П. Методы повышения стойкости микромеханических гироскопов к механическим воздействиям / М.И. Евстифеев, Д.П. Елисеев, И.Б. Челпанов // Гироскопия и навигация. – 2014. -№.4. – С. 56-68
4. Sang W. Vibration-induced errors in MEMC tuning fork gyroscopes / W. Sang, S. Lee, K. Najafi // Sensors and Actuators A 180 (2012). - p. 32-44.
5. Пат. 85528 України, МПК G01B 7/02. Мікромеханічний гіроскоп / П. М. Бондар, К.В. Лошкарьова. Заявник і патентовласник НТУУ «КПІ». - заявка № U2013005735, опубліковано 25.11.2013, бюл. №22/2013.
6. Боре́йко А. В. Мікромеханічний гіроскоп як вимірювач лінійних прискорень та кутових швидкостей / А. В. Боре́йко, К. В. Чередниченко, П. М. Бондар // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. - 2015. -Вип. 49(1). - С. 20 - 25.
7. Светлана Сысоева "MEMC-технологии. Простое и доступное решение сложных системных задач", журнал "ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес", 7/2009.
8. Сысоева С. Тенденции рынка High-end МЭМС-датчиков инерции. Новые уровни характеристик и исполнения //Компоненты и технологии. – 2014. – №. 6.
9. 2. Stephen Beeby, Graham Ensell, Michael Kraft, Neil White / MEMC Mechanical Sensors. - Chapter 3. - С. 1-4.
10. Kumar K., Barbour N., Elwell J. Emerging Low(er) Cost Inertial Sensors//The 2nd Saint Petersburg International Conference on Gyroscopic Technology and Navigation. – SPb.: CSRI “Elektropribor”, 1995. – Part 1. –P. 11–24.

11. Orlosky S., Morris H. A Quartz Rotational Rate Sensor /Systron Donner Inertial Division, BEI Electronic Company. – Sensors, February 1995.
12. Leger P. Quapason™ – A New Low–Cost Vibrating Gyroscope//3rd Saint Petersburg International Conference of Integrated Navigation Systems. – SPb.: CSRI “Elektropribor”, 1996. – Part 1. –P. 143–149.
13. Tomikawa Y. et al. Flatly Supported Vibratory Gyro–Sensor Using Trident–Type Tuning Fork Resonator. – Symposium Gyro Technology, Germany. – 1997. –P.8.0–8.12.
14. Microelectromechanical Systems Opportunities. A Department of Defense Dual–Use Technology Industrial Assessment, Final Report, December 1995.
15. Shkel A., Howe R., Horowitz R. Micromachined Gyroscopes: Challenges, Design Solutions and Opportunities//IARP International Workshop on Micro Robots, Micro Machines and Systems, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. – 1999. –P.27–34.
16. Connely J., Barbour N., Brand G. Manufacturing Micromachined Inertial Sensor Systems. – 4th Saint Petersburg International Conference of Integrated Navigation Systems. – SPb.: CSRI “Elektropribor”, 1997. –P. 362–370.
17. Лестев А.М., Попова И.В., Евстифеев М.И. и др. Разработка и исследование микромеханического гироскопа//Гироскопия и навигация. – 1999. – №2. – С. 3–23.
18. Barbour N. et al. Inertial Instruments: Where to Now? – 1st Saint Petersburg International Conference on Gyroscopic Technology and Navigation. – SPb.: CSRI “Elektropribor”, 1994. – P. 11–22.
19. Мезенцев А.П. и др. Основные проблемы создания инерциальных измерительных блоков на базе микромеханических гироскопов и акселерометров//Гироскопия и навигация. – 1997. – №1. – С.7–14.
20. Агильдиев В.М., Дрофа В.Н. Комбинированный микромеханический гироскоп–акселерометр для инерциальных измерительных систем//Космонавтика и ракетостроение. – 1995. – №5. – С.79–83.

21. Barbour N. et al. Micro–Electromechanical Instrument and Systems Development at Draper Laboratory//3rd Saint Petersburg International Conference of Integrated Navigation Systems. –SPb.: CSRI “Elektropribor”, 1996. – Part 1. – P. 3–10.
22. Weinberg M. et al. A Micromachined Comb Drive Tuning Fork Gyroscope for Commercial Applications. – The 2nd Saint Petersburg International Conference on Gyroscopic Technology and Navigation. – CSRI “Elektropribor”, 1995. – Part 2. –P. 79–87.
23. Гай Э. Наводящиеся снаряды с инерциальной навигационной системой на микромеханических датчиках, интегрированной с GPS//Гироскопия и навигация. – 1998. –№3. – С. 72–81.
24. Бабур Н., Шмидт Д. Направления развития инерциальных датчиков//Гироскопия и навигация. – 2000. – №1.– С.3–15.
25. Ash M.E. et al. Micromechanical Inertial Sensor Development at Draper Laboratory with Recent Test Results//Symposium Gyro Technology, Germany. – 1999.
26. Лестев А.М., Попова И.В., Евстифеев М.И. и др. Разработка и исследование микромеханического гироскопа//Гироскопия и навигация. – 1999. – №2. – С. 3–23.
27. Teegarden D., Lorenz G., Neul R. How to model and simulate gyroscope systems//IEEE Spectrum, July 1998. – Vol.35, №7.
28. Geiger W. et al. Improved Rate Gyroscope Designs Designated for Fabrication by Modern Deep Silicon Etching//Symposium Gyro Technology, Germany. – 1997. –P.2.0–2.8.
29. Gao Z., Dong Y. A Vibratory Wheel Micromachined Gyroscope//Symposium Gyro Technology, Germany. – 1998.
30. Geiger W. et al. A Silicon Rate Gyroscope with Decoupled Driving and Sensing Mechanisms MARS–RR//Symposium Gyro Technology, Germany. – 1998.
31. Geiger W. et al. DAVED – Micromachined, Decoupled Angular Velocity Detector// Symposium Gyro Technology, Germany. – 1999.

32. Kranz M.S., Fedder G.K. Micromechanical Vibratory Rate Gyroscopes Fabricated in Conventional CMOS//Symposium Gyro Technology, Germany. – 1997. –P.3.0–3.8.
33. Budkin V.L. et al. Development of Silicon Sensors for Navigation and Control Systems//IARP International Workshop on Micro Robots, Micro Machines and Systems, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. – 1999. –P.191–200.
34. Будкин В.Л. и др. Разработка кремниевых датчиков первичной информации для систем навигации и управления//Гироскопия и навигация. – 1998. – №3. – С. 94–101.
35. Ayazi F., Najafi K. High Aspect-ratio Dry-Release Poly-Silicon MEMC Technology for Inertial-Grade Microgyroscopes. – Position Location and Navigation Symposium, San Diego, California. – 2000. –P.304–308.
36. Северов Л.А. и др. Микромеханические гироскопы: конструкции, характеристики, технологии, пути развития. – Известия вузов, Приборостроение. – 1998. – т.41, №1–2. – С.57–73.
37. Wood D. A Monolithic Three-Axis Gyroscope. – MST News, 20/97, pp.14–15.
38. Hopkin I. Performance and Design of Silicon Micromachined Gyro//Symposium Gyro Technology, Germany. – 1997. –P.1.0–1.10.
39. Fell C.P., Hopkin I., Townsend K., Sturland I. A Second Generation Silicon Ring Gyroscope//Symposium Gyro Technology, Germany. – 1999.

ДОДАТОК А

Код керувальної програми без використання Simulink у середовищі Matlab:

```
clc
clear all
global h1 h2 k1 k2 lam q1 q2 Wx Wz Uyc NmX NcX NmZ NcZ
lam=18000*2*pi; %Частота і ампл. перв. колив.
m1=14e-4; m2=28e-4; %Маса інерційної маси, та рамки відповідно
f1=0.4; f2=0.4; %Коефіцієнт демпфування
h1=f1/m1; h2=f1/m1;
c1=2.4e3; c2=2.3e3; %Коефіцієнт пружності
q1=1e-5/m1; q2=0e-5/m2;
k1=(lam)^2; k2=1.02*(lam)^2;
w=500*2*pi; %Частота
Wx=0;%Прискорення по осі X.
Wz=0.01;%Прискорення по осі Z.

Uyc=10; %Швидкість

Z0=-Wz/k2
%% Інтегрування
Tk=0.02; y0=[0 0 0 0 0 0 0 0];
opts = odeset('RelTol',1e-10,'AbsTol',1e-12);
[tout,yout]=ode45('mmg_pr1',[0 Tk],y0,opts);
t=tout;
X1=yout(:,1); Z1=yout(:,3); % Первый гироскоп
X2=yout(:,5); Z2=yout(:,7); % Второй гироскоп
n=length(X1); Z_m=mean(Z1((n-n*0.1):end)) %Установ. знач. вторичных
Z_a=(max(Z1((n-n*0.1):end))-min(Z1((n-n*0.1):end)))/2 % Ампл. втор. колеб.

%% Графіки
figure
subplot(2,1,1)
plot(t,X1,'LineWidth',4),grid
set(gca, 'FontSize',14)
ylabel('X, м')
title('Первинні коливання')
subplot(2,1,2)
plot(t,Z1,'LineWidth',4),grid
set(gca, 'FontSize',14)
ylabel('Z, м')
xlabel('Час, с.')
title('Вторинні коливання')
% %% 2-х масовий
X_s=X1-X2; Z_s_Minus=Z1-Z2; Z_s_Plus=Z1+Z2;
Z_Usk=(max(Z_s_Plus)-min(Z_s_Plus))/2
figure
subplot(2,1,1)
plot(t,X2,'LineWidth',4),grid
set(gca, 'FontSize',14)
ylabel('X, м')
title('Первинні коливання')
subplot(2,1,2)
plot(t,Z_s_Minus,t, Z_s_Plus,'LineWidth',4),grid
set(gca, 'FontSize',14)
ylabel('Z, м')
xlabel('Час, с.')
```

```

title('Вторинні коливання')
legend('Z1-Z2','Z1+Z2')

figure
plot(t, Z_s_Plus,'r','LineWidth',4),grid
set(gca,'FontSize',14)
ylabel('Z, м')
title('Прискорення')
xlabel('Час, с.')

```

Код правих частин програми без використання Simulink у середовищі Matlab:

```

function z = mmg_pr1(t,y)
global h1 h2 k1 k2 q1 q2 lam Wx Wz Uyc
U=UgSk(t);

Q1=q1*sin(lam*t);
Q2=q2*sin(lam*t);

z(1)=y(2); %Первинні коливання 1 маси
z(2)=Q1-2*h1*y(2)-k1*y(1)-2*Uyc*y(4)-Wx;
z(3)=y(4); %Вторинні коливання 1 маси
z(4)=Q2-2*h2*y(4)-k2*y(3)+2*Uyc*y(2)-Wz;
z(5)=y(6); %Первинні коливання 1 маси
z(6)=-Q1-2*h1*y(6)-k1*y(5)-2*Uyc*y(8)-Wx;
z(7)=y(8); %Вторинні коливання 2 маси
z(8)=Q2-2*h2*y(8)-k2*y(7)+2*Uyc*y(6)-Wz;
z=z';

clc
clear all
close all

```

Код програми для обробки даних:

```

clc
clear all
%% Одномасовий
%1 дослід
x=[0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100];
y=[0 1.581e-14 3.61e-14 4.728e-14 6.325e-14 7.907e-14 9.488e-14 1.107e-13 1.265e-13
1.423e-13 1.581e-13];
figure
plot(x,y,'LineWidth',5),grid
set(gca,'FontSize',14)
ylabel('Амплітуда Z, м')
xlabel('Кутова швидкість, град/с.')
title('Постійна кутова швидкість')

%2 дослід
ZT=[0 -3.8323e-15 -1.1497e-14 -2.2994e-14 -3.4491e-14 -4.5988e-14];
x3=[0 0.5e-4 1.5e-4 3e-4 4.5e-4 6e-4];
Z=[0 -2.645e-15 -1.122e-14 -2.185e-14 -3.419e-14 -4.472e-14 ];
figure
plot(x3,Z,x3,ZT,'k^','LineWidth',4,'MarkerSize',10),grid
set(gca,'FontSize',14)
ylabel('Z усталене, м')
xlabel('Постійне прискорення, м/{с^2}')
legend('Z','Z-Теор');

```



```

title('Постійне прискорення')
%% Двомасовий
%1 дослід
x1=[0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100];
y1=[0 3.157e-14 6.355e-14 9.456e-14 12.647e-14 15.814e-14 18.976e-14 2.214e-13
2.528e-13 2.846e-13 3.157e-13];
figure
plot(x1,y1,'LineWidth',5),grid
set(gca,'FontSize',14)
ylabel('Амплітуда Z, м')
xlabel('Кутова швидкість, град/с')
title('Постійна кутова швидкість')

%2 дослід
x2=[0 0.5e-4 1.5e-4 3e-4 4.5e-4 6e-4];
Z0=[0 -3.755e-15 -1.159e-14 -2.291e-14 -3.451e-14 -4.58e-14];
ZT=[0 -3.8323e-15 -1.1497e-14 -2.2994e-14 -3.4491e-14 -4.5988e-14];
Z_Usk=[0 7.6347e-15 2.2904e-14 4.5808e-14 6.8712e-14 9.1617e-14];
figure
plot(x2,Z0,x2,Z_Usk,x2,ZT,'k^','LineWidth',4,'MarkerSize',10),grid
set(gca,'FontSize',14)
ylabel('Z усталене, м')
xlabel('Постійне прискорення, м/{с^2}')
legend('Z1+Z2','Z1-Z2','Z-Теор');
title('Постійне прискорення')

%3 дослід
x5=[0 0.5e-4 1.5e-4 3e-4 4.5e-4 6e-4];
Z_Usk1=[0 7.695e-15 2.342e-14 4.625e-14 7.0423e-14 9.3897e-14];
figure
plot(x5,Z_Usk1,'r','LineWidth',4),grid
set(gca,'FontSize',14)
ylabel('Амплітуда Z, м')
xlabel('Гармонічне прискорення, м/{с^2}')
title('Гармонічне прискорення')

```

ДОДАТОК Б

СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ _____ Медведчука Юрія Олеговича _____.

(прізвище, ім'я, по батькові)

№ з/п	Найменування праць	Назва видавництва, журналу (номер, рік) або номер авторського свідоцтва, номер диплома на винахід	Кількість друкованих аркушів або сторінок разом	Прізвища співавторів праць
1	2	3	4	5
1	Двомасовий мікромеханічний гіроскоп	Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси (ПРТК-2018)	2	Сапегін О.М.
2	Двомасовий мікромеханічний гіроскоп L-L типу	Погляд у майбутнє приладобудування: XI науково-практична конференція студентів та аспірантів. Збірник тез доповідей (2018).	2	Сапегін О.М.
3	Мікромеханічний гіроскоп як вимірювач прискорення	Третя Українська науково-технічна конференція «Спеціальне приладобудування: стан і перспективи»	3	Сапегін О.М. Губенко Є.А.
4	Двомасовий мікромеханічний гіроскоп	Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні (ЕІРП-2019)	3	Сапегін О.М.

Автор _____
(підпис)

Медведчук Юрій Олегович
(прізвище, ім'я, по батькові)


Зав. каф. ПСОН _____
(підпис)

Н.І. Бурай



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВОДНОГО ГОСПОДАРСТВА
ТА ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
WROCLAW UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
ІНЖЕНЕРНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ

ІНТЕГРОВАНІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ РОБОТОТЕХНІЧНІ КОМПЛЕКСИ ***ІІРТК - 2018***



Одинадцята міжнародна
науково-практична конференція
22-23 травня 2018 року
Київ, Україна

Збірка тез

Древецький В.В., Муран Р.О. Дослідження гідродинамічних процесів у відкритих руслах для визначення швидкості потоку та витрати води.	227
Єгоров С.В. Відновлення функціональних залежностей у випадку недостатності даних.	229
Іванчук В.В., Древецький В.В. Автоматична ідентифікація флегмового числа брагоректифікаційної установки та його вплив на кількісні показники готової продукції.	232
Коваленко О.О., Селенков В.М., Сасько О.С. Проектування засобів технологічного оснащення у складі САПР.	235
Козак Л.М., Клепач М.І. Автоматизована система поверхневого монтажу електронних компонентів.	239
Кучеров Д.П., Оникиєнко Л.С. Синтез решуючих функцій в задачах управління динамічними системами.	241
Медведчук Ю.О., Сапегін О.М. Мікромеханічний гіроскоп L-L типу.	243
Мельник В.Н. Парусность подвеса и влияние геометрической асимметрии кожуха.	245
Остапчук В.В., Реут Д.Т. Розробка системи контролю доступу на базі радіочастотної ідентифікації з автоматичною фотофіксацією порушень.	247
Бурау Н.І., Паздрій О.Я. Застосування дворівневої обробки інформації для діагностики пошкоджень елементів роторних систем.	249
Реут Д.Т., Древецький В.В. Підвищення точності розпізнавання колоніальних і багатоклітинних організмів мікропланктону за допомогою комп'ютерного зору.	251
Савлук А.П., Стрілець О.Р., Стрілець В.М. Вантажне гальмо у вигляді замкнутої гідросистеми.	253
Стрілець О.Р. Зупинник для ланки керування швидкістю через зубчастий диференціал.	256
Шатна А.В., Братчик О.В., Завадський В.Б. Інформаційна система обробки біомедичних зображень.	259
Шелуха О.О. Застосування інформаційних технологій навігації для забезпечення безпеки кораблеводіння.	262
Дяченко П.В. Оцінка динамічних характеристик механічної коливної системи у частотній області.	264
Любченко В.В. Трансформації даних в модулі візуалізації.	266
Аралова Н.І., Ключко О.М., Машкін В.І., Машкіна І.В. Математичне моделювання функціональної самоорганізації системи дихання льотчиків.	268
Ключко О.М., П'ятчаніна Т.В., Мазур М.Г., Басарак О.В. Методи онтології при створенні біомедичних інформаційних систем.	270
Ключко О.М., П'ятчаніна Т.В., Мазур М.Г., Басарак О.В. Розробка мережевих біомедичних інформаційних систем з базами даних.	273
Сташинський О.П. Методи вирішення оптимізаційної задачі режимів роботи магістральних газопроводів.	275

МІКРОМЕХАНІЧНИЙ ГІРОСКОП L-ЛТИПУ

Медведчук Ю.О., студент гр. ПГ-41, асистент, Сапегін О.М.
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Розробка перспективних систем навігації й керування рухом об'єктів різного призначення пов'язана з мініатюризацією систем, зниження їхньої вартості, енергоспоживання й експлуатаційних витрат [1].

Двохмасові мікрогіроскопи представляють собою, по суті, різні комбінації одномасового мікрогіроскопа з протифазним перемещенням інерційної маси в режимі переміщення і режимі чутливості.

Принципова схема ММГ розробки фірми The Charles Stark Draper Laboratory (США) приведена на Рис. 1.

ММГ має дві інерційні маси (ІМ) 1, підвішені на пружних елементах 3 щодо жорстких, базових елементів 2, які за допомогою анкерів 6 укріплені на деякій відстані від підкладки (підстави) 8. В режимі руху обидві ІМ переміщуються в протифазі допомогою електростатичних приводів 4, 7 (центрального і два бокових) гребінчастої структури уздовж осі X. При появі кутової швидкості Ω , навколо осі Y виникають сили інерції Коріоліса, які викликають протифазні переміщення інерційної маси уздовж осі Z з входом з площини XY. Переміщення інерційної маси в режимі чутливості можуть бути виміряні ємнісними вимірювачами, нерухомі електроди 5 яких розміщені на підкладці, а рухливі сформовані пластинах інерційної маси.

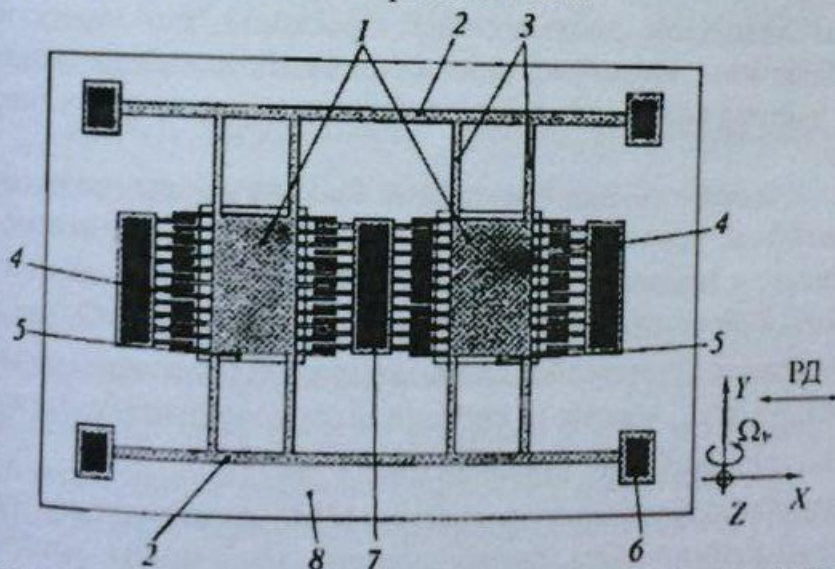


Рис. 1. Принципова схема МР розробки фірми The Charles Stark Draper Laboratory:

1 – Інерційна маса; 2 базовий елемент конструкції підвісу; 3 – пружні елементи підвісу; 4, 7 – електростатичні гребінчасті приводи; 5 – електроди вимірювачів переміщень; 6 – анкер; 8 – підкладка (основа)

У найпростішому випадку за умови рівності ІМ $m_1 = m_2 = m$ $m_1 = m_2 = m$, повної синхронності протифазних рухів в режимі переміщення і повної

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО"
ПРИЛАДОБУДІВНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

ЗБІРНИК ПРАЦЬ
XV НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ
КОНФЕРЕНЦІЇ СТУДЕНТІВ,
АСПІРАНТІВ ТА МОЛОДИХ ВЧЕНИХ

**ЕФЕКТИВНІСТЬ
ІНЖЕНЕРНИХ РІШЕНЬ
У ПРИЛАДОБУДУВАННІ**

**10-11 ГРУДНЯ 2019 РОКУ
М. КИЇВ, УКРАЇНА**



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ

імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ПРИЛАДОБУДІВНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

ФАКУЛЬТЕТ МЕНЕДЖМЕНТУ І МАРКЕТИНГУ



Інженерна Компанія

ТЕХНОПОЛІС



*XV Всеукраїнська науково-практична конференція студентів,
аспірантів та молодих вчених*

"ЕФЕКТИВНІСТЬ ІНЖЕНЕРНИХ РІШЕНЬ У ПРИЛАДОБУДУВАННІ"

10-11 грудня 2019 р.
м. Київ, Україна

Збірник праць конференції



КИЇВ 2019

З М І С Т

СЕКЦІЯ 1. ЕКОНОМІКА ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ НАВІГАЦІЙНИХ ПРИЛАДІВ І СИСТЕМ

В.О. Аксініченко, ст. гр. ПГ-81мп, к.т.н. Д.О. Півторак, МОДЕЛЮВАННЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО ДАТЧИКА	18
С.С. Афзель, студентка, гр. ПГ-91мп ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЇХ РОЗВИТКУ	22
М.О. Березанська, гр. ПГ-91мп ОГЛЯД ТА СУЧАСНИЙ СТАН ДАТЧИКІВ СЕРЦЕВОГО РИТМУ	26
Д.С. Бідник, студент гр. ПГ-п81 ОГЛЯД ТА СТАН СУЧАСНИХ ВІТРОГЕНЕРАТОРІВ	30
Медведчук Ю.О., студент гр. ПГ-81мп, Сапегін О.М. ДВОМАСОВИЙ МІКРОМЕХАНІЧНИЙ ГІРОСКОП	34
О.М.Палій, студент гр. ПГ - 81мп, Я.В.Чепік, студентка гр.ПГ - 91мп ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ПРОЕКТУВАННІ СУЧАСНИХ ПРИЛАДІВ СИСТЕМ ОРІЄНТАЦІЇ І НАВІГАЦІЇ	38
І.М. Платов, студент гр. ПГ-п71, О. М. Павловський, к.т.н., доцент ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ МОВИ FORTH НА СУЧАСНИХ МІКРОКОНТРОЛЕРАХ	41
А. В. Пономаренко, студент гр. ПГ-81мп, О. М. Павловський, доцент ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ІМПУЛЬСНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА НАПРУГИ НАПІВМОСТОВОГО ТИПУ	45
Д.С. Прозор, студент гр. ПГ-61, к.т.н., Мураховський С.А. РОБАСТНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ	50
М.Т. Чепіль, студент гр. ПГ-п81, асистент Сапегін О.М. ПРІЦЕЗІЙНИЙ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ	53

СЕКЦІЯ 2. ЕКОНОМІКА ВИРОБНИЦТВА І ВИКОРИСТАННЯ ОПТИЧНИХ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ ПРИЛАДІВ І СИСТЕМ

М.Д. Барановський, студент гр. ПО-82мп АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ ВПРОВАДЖЕННЯ ОПТИЧНИХ СИСТЕМ ТЕЛЕЦЕНТРИЧНИХ ОБ'ЄКТИВІВ	58
Басюк Г. П., студентка гр. ПО-91мп ПЕРЕВАГИ ІНТРАОПЕРАЦІЙНОЇ РЕФРАКТОМЕТРІЇ	62
Д.Р. Братова, студент гр. ПО-82мп АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ВЕЙВЛЕТ-ФІЛЬТРАЦІЇ	65
І.О. Вовчок, студент гр. ПО-82мп, О.І.Чікіда студент гр. ПО-82мп ПЕРСПЕКТИВНІ ДИФРАКЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ	69

УДК 621.45.017

Медведчук Ю.О., студент гр. ПГ-81мп, Сапегін О.М.
КПІ ім. Ігоря Сікорського

ДВОМАСОВИЙ МІКРОМЕХАНІЧНИЙ ГІРОСКОП

Анотація. У проведено розробку тривимірної конструкції мікромеханічного гіроскопа. Проведено імпорту отриманої 3D моделі приладу в систему MATLAB. Проведено моделювання роботи мікромеханічного гіроскопа в умовах вібрації та показано, що такий гіроскоп може бути датчиком як кутової швидкості так і прискорення.

Ключові слова: мікромеханічний гіроскоп, ММГ, вторинні коливання інерціальний вимірювальний модуль.

ВСТУП

В навігаційних системах та системах стабілізації і керування рухом основними датчиками первісної інформації про кутові та лінійні переміщення об'єкту є гіроскопічні прилади різних типів і акселерометри. З розвитком мікроелектронних технологій у наш час стало можливим використання їх для створення мініатюрних інерційних вимірювачів, що отримали назву мікромеханічних [1].

Діапазон застосування мікромеханічних інерційних датчиків надзвичайно широкий. Мікромеханічні датчики дозволяють створювати малогабаритні інерціальні навігаційні системи, інтегрувати їх із супутниковими навігаційними системами, та забезпечувати необхідну точність визначення положення та орієнтації різних рухомих об'єктів: літальних апаратів, морських об'єктів, наземних транспортних засобів [2]–[5].

ПРОГРАМНИЙ АЛГОРИТМ ММГ LL-ТИПУ

У роботі [6] наведено математичну модель одномасового мікромеханічного гіроскопа (ММГ) LL-типу

$$\ddot{x} + 2h_1\dot{x} + \left[k_1^2 - (u_{yc}^2 + u_{zc}^2)\right]x + 2u_{yc}\dot{z} + u_{xc}u_{zc}z = q_1$$

$$\ddot{z} + 2h_2\dot{z} + \left[k_2^2 - (u_{yc}^2 + u_{xc}^2)\right]z - 2u_{yc}\dot{x} - u_{xc}u_{zc}x = q_2 \quad (1)$$

Можна відмітити, що перше рівняння системи (1) описує первинні коливання інерційної маси (ІМ), викликані системою збудження, а друге – вторинні коливання, що виникає внаслідок дії зовнішньої кутової швидкості. В подальшому припускається, що інерційні маси і пружні елементи двомасового гіроскопа виготовлені ідентичними, тоді його динаміка буде описуватись двома системами (1). В такому випадку амплітуда первинних коливань другої ІМ буде мати протилежний знак.

РОЗРОБКА ТРИВИМІРНОЇ МОДЕЛІ ММГ

ММГ найчастіше працюють в умовах високочастотних вібрацій, тому доцільно використовувати багатомасові чутливі елементи. За основу прийнято модель ММГ запропоновану в роботі [7]. На її основі було розроблено тривимірну модель двомасового ММГ LL-типу у середовищі SolidWorks. В конструкції застосовано додатковий пружний елемент, що пов'язує рухомі



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
ПРИЛАДОБУДІВНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

*XI Всеукраїнська
науково-практична конференція
студентів та аспірантів*

«ПОГЛЯД У МАЙБУТНЄ ПРИЛАДОБУДУВАННЯ»

*15-16 травня 2018 р.
м. Київ, Україна*

ЗБІРНИК СТАТЕЙ

Київ 2018

З М І С Т

СЕКЦІЯ 1. КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА СИСТЕМИ НАВІГАЦІЇ І КЕРУВАННЯ

<i>В.О. Аксініченко, студент гр. ПГ-41, к.т.н., доц. Павловський О.М.</i> АВІАЦІЙНА АВТОНОМНА СИСТЕМА ЖИВЛЕННЯ БОРТОВИХ ПРИЛАДІВ	16
<i>Є. І. Білоус, студент гр. ПГ-71мн, к.т.н., доц. Нестеренко О. І.</i> РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ БЕЗПЛАТФОРМНОЇ ІНЕРЦІАЛЬНОЇ КУРСОВЕРТИКАЛІ НА ОСНОВІ КВАТЕРНІОННИХ РІВНЯНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ ФІЛЬТРА КАЛМАНА	19
<i>Д.В. Бугайов, студент гр. ПГ-61м</i> АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД З ВИСТАВКИ БІНС	23
<i>Василенко Д.И., студент гр. ПГ-41</i> ТЕМПЕРАТУРНАЯ КАЛИБРОВКА	26
<i>В.Ю. Герман, студент гр. ПГ-41</i> ДВОКОЛІСНИЙ АВТОБАЛАНСУЮЧИЙ РОБОТ З ВЕРХНЬОЮ МАЯТНИКОВІСТЮ	30
<i>А.М. Літош, студент гр. ПГ-61м, к.т.н., ас. Лакоза С.Л.</i> МЕТОДИ РОЗДІЛЕННЯ КАНАЛІВ БЕЗПЛАТФОРМНОЇ КУРСОВЕРТИКАЛІ	34
<i>Ю.О. Медведчук, студент гр. ПГ-41, асистент, Сапегін О.М.</i> ДВОХМАСОВИЙ МІКРОМЕХАНІЧНИЙ ГІРОСКОП	38
<i>К.Ю. Мульганов, студент гр. ПГ-71мп</i> ГІРОСТАБІЛІЗАТОРИ ДЛЯ МАЛОГАБАРИТНИХ ОБ'ЄКТІВ	41
<i>А.В. Осовцев, студент гр. ПГ-61м, А.І. Вознюк, аспірант.</i> ПОРІВНЯННЯ ЦИФРОВОГО ТА АНАЛОГОВОГО РЕГУЛЯТОРА У СИСТЕМІ СТАБІЛІЗАЦІЇ ОБЛАДНАННЯ	45
<i>І.М. Платов, студент гр. ПГ-71п, к.т.н., доц. Павловський О.М.</i> ПЕРЕВАГИ ВИКОРИСТАННЯ ВІДЛАДОЧНИХ ПЛАТ STM32DISCOVERY У НАВЧАЛЬНОМУ ПРОЦЕСІ НА КАФЕДРІ ПСОН	49
<i>О.М. Поліщук, студент гр. ПГ-41.</i> КРОКОМІР НА МІКРОМЕХАНІЧНИХ ДАТЧИКАХ	53
<i>А. В. Пономаренко, студент гр. ПГ-41, Яцко Л. Л., к. т. н.</i> ВДОСКОНАЛЕННЯ СХЕМОТЕХНІКИ ПРИСТРОЮ ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ ПЛАТИ	57
<i>М.О. Романов, студент гр. ПГ-61м, к.т.н., доц. Мироненко П.С.</i> КОМПЕНСАЦІЯ ПОХИБКИ АКСЕЛЕРОМЕТРА ЗА ДОПОМОГОЮ ДОДАТКОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ ПРО РУХ ІНЕРЦІЙНОЇ МАСИ	61
<i>О.А. Суровцев, студент гр. ПГ-41, Павловський О.М. к.т.н., доцент</i> ПОРІВНЯННЯ СУЧАСНИХ БЕЗДРОТОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ОБМІНУ ІНФОРМАЦІЄЮ	64

УДК 531.383

Ю.О. Медведчук, студент гр. ПГ-41, асистент, Сапегін О.М.
КПІ ім. Ігоря Сікорського

ДВОХМАСОВИЙ МІКРОМЕХАНІЧНИЙ ГІРОСКОП

Анотація Робота присвячена розробці конструкції та дослідженню двохмасового мікромеханічного гіроскопа. Була використана математична модель гіроскопа L-L типу, що описує поведінку чутливого елемента при повороті основи з відомою кутовою швидкістю. На основі математичної була створена програма моделі у середовищі Matlab. Це дозволило проводити дослідження гіроскопа при різному русі основи та вибирати параметри чутливого елемента. Разом з цим було розроблено конструкцію мікромеханічного гіроскопа у середовищі SolidWorks та імпортовано для подальших досліджень у Matlab за допомогою Simscape Multibody.

Ключові слова: мікромеханічний гіроскоп, моделювання, Simscape Multibody.

ВСТУП

Розробка перспективних систем навігації й керування рухом об'єктів різного призначення пов'язана з мініатюризацією систем, зниження їхньої вартості, енергоспоживання й експлуатаційних витрат [1].

Мініатюризація навігаційних систем вимагає створення малогабаритних гіроскопічних датчиків. Пошук нових можливостей створення інерційних датчиків з необхідними характеристиками й прогрес в області мікроелектроніки привели до появи нового класу приладів – мікромеханічних гіроскопів (ММГ). У цей час питання створення й використання ММГ привертає все більшу увагу розроблювачів і споживачів малогабаритних датчиків параметрів руху.

Сучасні ММГ значно уступають по точності традиційним електромеханічним гіроскопам, але перевищують їх по масо-габаритним характеристикам, показникам собівартості й енергоспоживання [2].

Істотне зниження масо-габаритних, вартісних і енергетичних характеристик відкриває нові шляхи використання ММГ у цивільній і військовій областях, де раніше їх застосування було неможливо через масо-габаритні обмеження або з економічних міркувань.

Серед можливих областей застосування ММГ як датчики параметрів руху можна назвати: автомобільна промисловість, навігаційне устаткування й військова техніка, робототехніка, медицина, товари широкого вжитку [3].

ДВОХМАСОВИЙ МІКРОМЕХАНІЧНИЙ ГІРОСКОП L-L ТИПУ

Двохмасові мікрогіроскопи представляють собою, по суті, різні комбінації одномасового мікрогіроскопа з протифазним перемещенням інерційної маси в режимі переміщення і режимі чутливості.

Принципова схема ММГ розробки фірми The Charles Stark Draper Laboratory (США) приведена на Рис. 1.

ММГ має дві інерційні маси (ІМ) 1, підвішені на пружних елементах 3 щодо жорстких, базових елементів 2, які за допомогою анкерів 6 укріплені на деякій відстані від підкладки (підстави) 8. В режимі руху обидві ІМ переміщуються в протифазі допомогою електростатичних приводів 4, 7 (центральний і два бокових) гребінчастої структури уздовж осі X. При появі кутової швидкості Ω , навколо осі Y виникають сили інерції Коріоліса, які виклика-

ють протифазні переміщення інерційної маси уздовж осі Y з входом з площини XZ. Переміщення інерційної маси в режимі чутливості можуть бути виміряні ємнісними вимірювачами, нерухомі електроди 5 яких розміщені на підкладці, а рухливі сформовані пластинах інерційної маси.

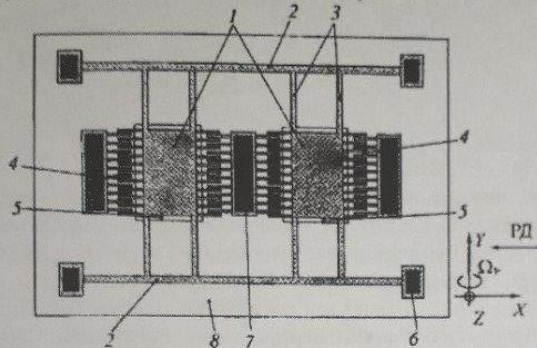


Рис. 1. Принципова схема МР розробки фірми The Charles Stark Draper Laboratory:
1 – Інерційна маса; 2 базовий елемент конструкції підвісу; 3 – пружні елементи підвісу; 4,7 – електростатичні гребінчасті приводи; 5 – електроди вимірювачів переміщень; 6 – анкер; 8 – підкладка (основа)

У найпростішому випадку за умови рівності ІМ $m_1 = m_2 = m$, повної синхронності протифазних рухів в режимі переміщення і повної симетрії пружних властивостей підвісу рух кожної інерційної маси може бути описано системою рівнянь:

$$\begin{cases} m\ddot{x} + b_x\dot{x} + G_x x = F_0 \sin \rho t - 2mv\Omega_z \varepsilon \\ m\ddot{y} + b_y\dot{y} + G_y y = -(F_0 \sin \rho t) \varepsilon - 2mv\Omega_z \end{cases} \quad (1.1)$$

Де координата x відповідає режиму переміщення, а координата y – режиму чутливості.

Технологія виготовлення гіроскопа оснований на травленні кремнієвої пластини. Структура, що отримується анодним зварюванням, прикріплюється до підкладки зі скла марки Ругех, на якій розміщуються електроди. Для отримання кінцевої структури використовуються реактивне іонне травлення і дифузія бору.

Серійна технологія виготовлення гіроскопа була передана корпорації Rockwell International (США). Для автомобільних застосувань гіроскоп має смугу пропускання частот 50 Гц і діапазон вимірюваних швидкостей 50...500 $^{\circ}/c^{\circ}/c$.

Була розроблена конструкція двохмасового ММГ L-L типу. Конструктивна схема представлена на рис.2.